



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

## Predicción de oleaje en la costa catalana validada con observaciones de satélite

Treball realitzat per:

**Javier Rodríguez Gallego**

Dirigit per:

**Manel Espino Infantes, Elena Pallarès López**

Grau en:

**Enginyeria d'Obres Públiques**

Barcelona, Juny de 2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**





# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>17</b>
1.1. Organización de la tesina . . . . .	19
<b>2. Estado del arte</b>	<b>21</b>
2.1. Ámbito de estudio . . . . .	21
2.2. Definiciones . . . . .	23
2.3. Copernicus Marine Environment Monitoring Service . . . . .	27
2.4. Observaciones de oleaje . . . . .	29
2.4.1. Satélites . . . . .	29
2.4.1.1. Jason 3 . . . . .	31
2.4.1.2. Sentinel 3A . . . . .	32
2.4.1.3. SARAL/AltiKa . . . . .	33
2.4.2. Boyas oceanográficas . . . . .	34
2.5. El modelo SWAN . . . . .	36
2.5.1. Base teórica . . . . .	37
2.5.2. Métodos numéricos . . . . .	38
2.5.3. Unidades . . . . .	38
2.5.4. Mallas computacionales y condiciones iniciales . . . . .	38
2.5.5. Limitaciones . . . . .	39
<b>3. Objetivos</b>	<b>41</b>
<b>4. Materiales y métodos</b>	<b>45</b>
4.1. Obtención de datos de oleaje . . . . .	45
4.1.1. Datos de boyas . . . . .	47
4.1.2. Datos de satélites . . . . .	50
4.1.3. Datos de predicción . . . . .	50
4.1.4. Formato de archivos tipo NetCDF . . . . .	51
4.2. Comparación de datos in situ . . . . .	55
4.3. Validación y análisis estadístico . . . . .	58
4.4. Modelado . . . . .	60
4.4.1. Preparación del entorno . . . . .	62

4.5.	Condiciones iniciales . . . . .	64
4.5.1.	Comandos de inicio ( <i>Start-up</i> ) . . . . .	64
4.5.2.	Mallas, condiciones iniciales y física ( <i>Model description</i> ) . . . . .	64
4.5.3.	Datos de salida ( <i>Output</i> ) . . . . .	68
4.5.4.	Cálculo ( <i>Lock-up</i> ) . . . . .	69
4.6.	Computación . . . . .	70
4.7.	Postproceso . . . . .	72
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>73</b>
5.1.	Validación de las observaciones de satélite a partir de las medidas de boyas in situ .	73
5.2.	Validación de las predicciones del modelo Med-Waves a partir de las medidas in situ y satélite . . . . .	81
5.2.1.	Boyas . . . . .	81
5.2.2.	Comparación de la malla del modelo Med-Waves con las observaciones de satélite . . . . .	89
5.3.	Validación del modelo de alta resolución implementado en SWAN a partir de las medidas in situ y satélite . . . . .	100
5.3.1.	Boyas . . . . .	100
5.3.2.	Comparación de la malla del modelo SWAN con las observaciones de satélite	108
5.4.	Intercomparación entre los modelos Med-Waves y SWAN . . . . .	111
<b>6.</b>	<b>Discusión</b>	<b>119</b>
6.1.	Validación de las observaciones de satélite a partir de las medidas de boyas in situ .	119
6.2.	Validación de las predicciones del modelo Med-Waves a partir de las medidas in situ y satélite . . . . .	120
6.3.	Validación del modelo de alta resolución implementado en SWAN a partir de las medidas in situ y satélite . . . . .	120
6.4.	Intercomparación entre los modelos Med-Waves y SWAN . . . . .	121
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>123</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>125</b>
	<b>Nomenclatura</b>	<b>129</b>
	<b>Anejo de resultados</b>	<b>131</b>
	Boyas . . . . .	131
	Validación de las observaciones de satélite a partir de las medidas de boyas in situ . . . .	132
	Validación de las predicciones del modelo Med-Waves a partir de las medidas in situ y satélite . . . . .	148
	Mapas de altura de ola . . . . .	164

<b>Anejo de modelado</b>	<b>177</b>
Archivo para el mes de Julio de 2017 . . . . .	178
Archivo para el mes de Agosto de 2017 . . . . .	189
<b>Anejo de cálculo y posproceso</b>	<b>201</b>
Librería CMEMS . . . . .	201
Script de ejemplo para la colocación de satélites . . . . .	235



# Índice de figuras

2.1. Topografía y batimetría del mar Balear y la costa de Cataluña . . . . .	21
2.2. Daños en Malgrat de Mar (Barcelona) debidos al temporal de 2017 . . . . .	22
2.3. Línea R1 de ferrocarril a la altura de Mataró (Barcelona) . . . . .	22
2.4. Definición de altura de ola y periodo de ola en una serie temporal de elevación del mar [Holthuijsen, 2007]) . . . . .	23
2.5. Suma de olas armónicas, con amplitudes y fases constantes pero aleatorias, formando un estado aleatorio de oleaje [Holthuijsen, 2007] . . . . .	25
2.6. Espectro bidimensional de oleaje generado por viento (en coordenadas polares) [Holthuijsen, 2007] . . . . .	26
2.7. Ejemplos de productos ofrecidos por CMEMS: niveles de clorofila en los océanos y campos de viento (Mercator Ocean/CMEMS) . . . . .	27
2.8. Catálogo de productos del CMEMS [Copernicus, 2017] . . . . .	28
2.9. Esquema del funcionamiento del satélite Jason-3 (ESA) . . . . .	29
2.10. Jason 3 (NASA) . . . . .	31
2.11. Satélite Sentinel 3A (ESA) . . . . .	32
2.12. Boya oceanográfica [Bengt Karlson et al., 2009] . . . . .	34
2.13. Red de boyas pertenecientes a Puertos del Estado . . . . .	35
4.1. Boyas utilizadas en el proceso de validación de los satélites Jason 3 y Sentinel 3A . . . . .	47
4.2. Centros In Situ TAC . . . . .	48
4.3. Tabla descriptiva de QC . . . . .	48
4.4. Proceso de generación de datos in situ . . . . .	49
4.5. Proceso de generación de datos de satélite . . . . .	50
4.6. Comparativa de ciclos completos entre Sentinel 3A (27 días) y Jason 3 (10 días). . . . .	53
4.7. Dominio de la malla de la predicción Med-Waves de CMEMS . . . . .	54
4.8. Proceso de generación de predicción de oleaje . . . . .	54
4.9. Trazas combinadas de los satélites Jason 3 y Sentinel 3A en el ámbito de estudio . . . . .	55
4.10. Ejemplo de colocación de trazas de satélite con la boya costera de Barcelona . . . . .	56
4.11. Ejemplo de diagrama de Taylor, donde se ha comparado la altura de ola entra la boya de Le Planier, la predicción de CMEMS y la observación del satélite Sentinel 3A. En este caso, el coeficiente de correlación adquiere valor negativo, por lo que hay un valor fuera del primer cuadrante. . . . .	58

4.12. Mapa de altura de ola para el mar Balear en Noviembre de 2017. Los contornos pertenecen a la predicción CMEMS, con sobreposición de observaciones del satélite Jason 3. . . . .	59
4.13. Ejemplo de diagrama de dispersión entre el valor de altura de ola observado por el satélite Sentinel 3A y el predicho por el modelo de CMEMS para todo el Mediterráneo en el período de Julio de 2017 a Mayo de 2018 (104000 observaciones) . . .	60
4.14. Proceso de ejecución del modelado . . . . .	61
4.15. Representación de las mallas utilizadas en el modelado. Se diferencian la malla de la batimetría (rosa), la malla computacional (azul) y los contornos de las condiciones iniciales en los bordes Norte, Este y Sur (azul, verde y rojo). . . . .	65
4.16. Vista en perspectiva de la batimetría utilizada (EMODnet) . . . . .	66
4.17. Dominio de los vientos introducidos en el modelo. . . . .	66
5.1. Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa . . . . .	74
5.2. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa . . . . .	74
5.3. Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa . . . . .	75
5.4. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa . . . . .	76
5.5. Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa . . . . .	77
5.6. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa . . . . .	78
5.7. Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa . . . . .	79
5.8. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa . . . . .	80
5.9. Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves . . . . .	81
5.10. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves . . . . .	82
5.11. Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves . . . . .	83
5.12. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves . . . . .	84
5.13. Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves . . . . .	85

5.14. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves	86
5.15. Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves	87
5.16. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves	88
5.17. Mapa de las zonas del mar Mediterráneo analizadas. Se diferencia el dominio mayor del mar Mediterráneo (azul) y el dominio reducido del mar Balear (rojo)	89
5.18. Diagrama de dispersión entre el satélite Sentinel 3A y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Mediterráneo, de Julio de 2017 a Mayo de 2018. 109943 puntos analizados	90
5.19. Diagrama de dispersión entre el satélite Jason 3 y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Mediterráneo, de Julio de 2017 a Mayo de 2018. 120709 puntos analizados	91
5.20. Diagrama de dispersión entre el satélite SARAL/AltiKA y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Mediterráneo, de Julio de 2017 a Mayo de 2018. 69707 puntos analizados	92
5.21. Diagrama de dispersión entre el satélite Sentinel 3A y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 913 puntos analizados	93
5.22. Diagrama de dispersión entre el satélite Jason 3 y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 1300 puntos analizados	94
5.23. Diagrama de dispersión entre el satélite SARAL/AltiKA y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 312 puntos analizados	95
5.24. Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Sentinel 3A para el día 6 de Octubre de 2017 a las 21:12h	96
5.25. Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Sentinel 3A para el día 6 de Noviembre de 2017 a las 21:08h	97
5.26. Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Sentinel 3A para el día 2 de Diciembre de 2017 a las 10:15h	97
5.27. Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Jason 3 para el día 10 de Noviembre de 2017 a las 09:53h	98
5.28. Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Jason 3 para el día 13 de Noviembre de 2017 a las 09:05h	99
5.29. Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Jason 3 para el día 3 de Diciembre de 2017 a las 05:02h	99
5.30. Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN	100
5.31. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN	101

5.32. Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN . . . . .	102
5.33. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN . . . . .	103
5.34. Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN . . . . .	104
5.35. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN . . . . .	105
5.36. Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN . . . . .	106
5.37. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN . . . . .	107
5.38. Diagrama de dispersión entre el satélite Sentinel 3A y el modelo SWAN para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 913 puntos analizados . . . . .	108
5.39. Diagrama de dispersión entre el satélite Jason 3 y el modelo SWAN para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 1300 puntos analizados . . . . .	109
5.40. Diagrama de dispersión entre el satélite SARAL/AltiKa y el modelo SWAN para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 312 puntos analizados . . . . .	110
5.41. Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN . . . . .	111
5.42. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN . . . . .	112
5.43. Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN . . . . .	113
5.44. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN . . . . .	114
5.45. Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN . . . . .	115
5.46. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN . . . . .	116
5.47. Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN . . . . .	117



5.48. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN	118
7.1. Mapa detalle del Golfo de Lion y situación de las boyas oceanográficas francesas	131
7.2. Serie temporal de la boya de Sa Dragonera con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	132
7.3. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Sa Dragonera y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	133
7.4. Serie temporal de la boya de Espiguette con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	134
7.5. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Espiguette y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	135
7.6. Serie temporal de la boya de Leucate con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	136
7.7. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Leucate y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	137
7.8. Serie temporal de la boya de Maó con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	138
7.9. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Maó y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	139
7.10. Serie temporal de la boya de Porquerolles con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	140
7.11. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Porquerolles y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	141
7.12. Serie temporal de la boya de Sète con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	142
7.13. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Sète y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa	143
7.14. Serie temporal de la boya costera de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	144
7.15. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Tarragona y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	145
7.16. Serie temporal de la boya de València con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	146
7.17. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de València y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa	147
7.18. Serie temporal de la boya de Sa Dragonera con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves	148
7.19. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Sa Dragonera y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves	149

7.20. Serie temporal de la boya de Espiguette con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	150
7.21. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Espiguette y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	151
7.22. Serie temporal de la boya de Leucate con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	152
7.23. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Leucate y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	153
7.24. Serie temporal de la boya de Maó con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	154
7.25. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Maó y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	155
7.26. Serie temporal de la boya de Porquerolles con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	156
7.27. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Porquerolles y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	157
7.28. Serie temporal de la boya de Sète con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	158
7.29. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Sète y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	159
7.30. Serie temporal de la boya costera de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	160
7.31. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	161
7.32. Serie temporal de la boya de València con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	162
7.33. Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de València y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves . . . . .	163
7.34. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 17h del 1 de Diciembre de 2017 . . . . .	164
7.35. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 19h del 2 de Diciembre de 2017 . . . . .	165
7.36. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 08h del 9 de Diciembre de 2017 . . . . .	166
7.37. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 11h del 17 de Diciembre de 2017 . . . . .	167
7.38. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 03h del 19 de Diciembre de 2017 . . . . .	168
7.39. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 12h del 27 de Diciembre de 2017 . . . . .	169

7.40. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 01h del 10 de Noviembre de 2017 . . . . .	170
7.41. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 00h del 14 de Noviembre de 2017 . . . . .	171
7.42. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 06h del 16 de Noviembre de 2017 . . . . .	172
7.43. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 01h del 26 de Noviembre de 2017 . . . . .	173
7.44. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 02h del 27 de Noviembre de 2017 . . . . .	174
7.45. Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 13h del 29 de Noviembre de 2017 . . . . .	175



# Índice de tablas

4.1. Características de las boyas utilizadas en el proceso de validación de satélites . . . .	49
5.1. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.1)	73
5.2. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.3) . . . . .	75
5.3. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.5) . .	77
5.4. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.7)	79
5.5. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.9)	81
5.6. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.11) . . . . .	83
5.7. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.13) .	85
5.8. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.15)	87
5.9. Estadísticos de las dispersiones 5.18, 5.19 y 5.20 de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa frente al modelo Med-Waves para el mar Mediterráneo . . . . .	90
5.10. Estadísticos de las dispersiones 5.21, 5.22 y 5.23 de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa frente al modelo Med-Waves para el mar Balear . . . . .	93
5.11. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.30)	100
5.12. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.32) . . . . .	102
5.13. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.34) .	104
5.14. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.36)	106
5.15. Estadísticos de las dispersiones 5.38, 5.39 y 5.40 de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa frente al modelo SWAN para el mar Balear . . . . .	108
5.16. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.41)	111
5.17. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.43) . . . . .	113
5.18. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.45) .	115
5.19. Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.47)	117



# Introducción

Las olas sobre la superficie del mar es uno de los mejores paisajes de los que se puede disfrutar gracias a la naturaleza, que los hace variar desde el movimiento caótico debido a un huracán hasta el suave vaivén del oleaje en una playa tropical. Los científicos se interesan en la dinámica y cinemática de las olas; cómo se generan mediante el viento, por qué se rompen y cómo interactúan con las corrientes y el fondo marino. En cambio, el ingeniero, frecuentemente tiene que diseñar, operar o gestionar estructuras o sistemas dentro del entorno marino como puertos, barcos, diques, plataformas o muelles. En mayor o menor grado, el comportamiento de estas estructuras está condicionado por el oleaje y se necesita un mínimo conocimiento sobre ellas. Cabe recordar que en los primeros 100 km alrededor de la línea de costa se aloja alrededor del 60 % de la población mundial [Hales, 2007]. Las zonas costeras han sido siempre un foco de atracción para el ser humano, ya que se dan a cabo multitud de actividades socioeconómicas como la pesca, el recreo y logística, y donde también se ubican las mayores ciudades del planeta [Brown et al., 2013].

El mar Mediterráneo es una zona donde durante la mayor parte del año apenas hay una variación del nivel del mar, lo que ha supuesto que a lo largo de los años se provoque cierta subestimación por parte de la población sobre los verdaderos peligros en los entornos costeros. Aun así, no son raros los casos de temporales que, junto a niveles altos de alturas de ola, han provocado daños severos en puertos, diques e infraestructuras. Por ello, es necesario poder prever la ocurrencia de estos fenómenos para gestionar de manera adecuada las actividades que se desarrollan en la costa, tanto por protección de la población ante un suceso de estas características (predicción y aviso) como de las obras e infraestructuras que se construyen y mantienen en estas áreas (dimensionado y parámetros de construcción). El Mediterráneo, al ser un entorno semicerrado, cuando se realizan dichas predicciones de oleaje en distancias cercanas a la costa se obtienen ligeros errores de subestimación de altura de ola y otros más severos en los valores de período de oleaje [Pallarès, 2016].

La precisión en las predicciones de oleaje, junto a la información de vientos y corrientes, es un punto clave para proporcionar un mejor soporte a las decisiones para la gestión de las costas, puertos y autoridades de navegación, y especialmente interesante para el asesoramiento sobre peligros/riesgos y vulnerabilidades en la costa durante eventos de temporales. Cuando nos referimos a zonas costeras, las predicciones comienzan a complicarse, y la transición desde modelos globales hasta escalas costeras ha sido desde hace décadas un punto de interés, llegando a generar proyectos de investigación como el NOPP [Peth, 2018] o el MyWave [Peter Janssen, 2018], involucrando a un

gran número de modelos de oleaje.

La costa catalana es uno de los claros ejemplos de ámbitos donde aún hay trabajo por hacer en modelos de predicción en entornos complejos. En esta zona hay varios estudios previos donde se ha caracterizado el clima de oleaje típico, que está controlado por *fetch* cortos, una batimetría compleja con profundos cañones cerca de la costa, una alta variabilidad en los campos de viento en el tiempo y en el espacio y flujos de viento canalizados por valles de ríos, dando a cabo una combinación de oleaje tipo *swell* y mar de fondo [Bolaños, 2004]; [A Sánchez-Arcilla, 2008]; [Alomar, 2012]. Todas estas características son las que limitan la confianza en las predicciones de oleaje en el área [A Sánchez-Arcilla, 2014].

Un proceso habitual tras ejecutar simulaciones de oleaje en una zona es la posterior validación de los datos, en los que se comparan los valores obtenidos en el modelo con los datos reales obtenidos mediante instrumentos. Hasta ahora, únicamente se obtenían datos in-situ de boyas oceanográficas, con lo que los puntos de control del modelado quedaban reducidos a la mínima parte. Ahora, mediante los datos aportados por las observaciones de satélite, es posible realizar la comprobación de resultados en un amplio rango espacial.



## 1.1. Organización de la tesina

Tras presentar la introducción en el primer capítulo, este trabajo está subdividido en otros seis capítulos, un apartado de referencias y dos anejos. A continuación, se detallan los contenidos ofrecidos en cada uno de los apartados:

- En el capítulo 2 se presenta el estado del arte, donde se detalla el ámbito geográfico de estudio, un pequeño resumen de definiciones sobre el oleaje y información sobre los satélites y el modelo de predicción SWAN.
- En el capítulo 3 se resumen los objetivos de esta tesina y las tareas necesarias para su desarrollo.
- En el capítulo 4 se detalla el procedimiento empleado en el estudio, desde la obtención de datos, el cálculo de los valores estadísticos, la comparativa satélite-boya y la programación de las simulaciones con el modelo SWAN.
- En el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos.
- En el capítulo 6 se discuten dichos resultados.
- Por último, el capítulo 7 muestra las conclusiones de este trabajo.

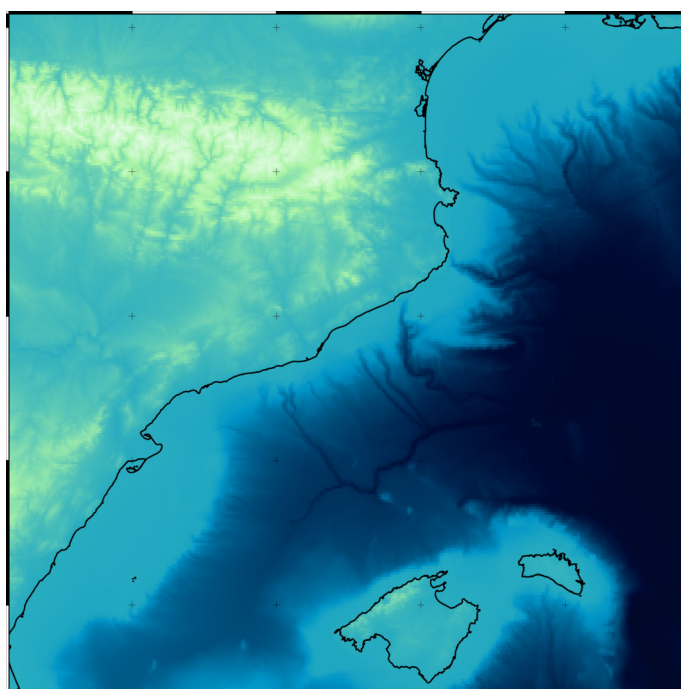
En el primer anejo se adjuntan intervalos extendidos de los resultados obtenidos del modelo. En el segundo, se incluye el código programado con el que realizar todos los cálculos y la representación de resultados.



# Estado del arte

## 2.1. Ámbito de estudio

Cataluña se encuentra situada en el extremo Noreste de la Península Ibérica, al suroeste de Europa. Sus límites se definen entre los  $0^{\circ}$  y  $3^{\circ}$  de longitud y de los  $40^{\circ}$  hasta los  $42^{\circ}$  de latitud. La costa se desarrolla a lo largo de 600 km, y la región del mar Mediterráneo comprendido entre las islas Baleares y la costa corresponde al mar Balear (Figura 2.1).



**Figura 2.1:** Topografía y batimetría del mar Balear y la costa de Cataluña

Esta zona se caracteriza por sufrir sistemas de altas y bajas presiones divididos por barreras orográficas, que determinan la distribución espacial de los vientos y las diferencias en la temperatura entre mar y tierra. Son dominantes los vientos de Mestral y Tramontana, al norte causados por la presencia de los Pirineos, y al sur debidos a la canalización de las corrientes a través del valle del río Ebro [Bolaños et al., 2009].

La costa del Mediterráneo está influenciada por los fenómenos ambientales y meteorológicos

que afectan a la población residente en los primeros metros de costa. Esta población se ha incrementado en la mayoría de localidades, debido a la asunción de una línea de costa estable. Esta idea probablemente se vea reforzada por el estado en calma del mar la mayoría del año, resultando en una falsa percepción de seguridad por parte de la sociedad. En los últimos 20 años y a causa de temporales marítimos han sido al menos 50 personas las que han perdido la vida en el Mediterráneo Occidental, y también se han producido daños severos en defensas costeras, puertos, diques y infraestructura, con un coste alrededor de los 30 millones de Euros [Gracia V. et al., 2014] (Figura 2.2). La costa catalana no es una excepción, ya que es una zona densamente poblada con alrededor del 70 % de la población situada en los primeros 50 km de costa, y donde diversas infraestructuras cercanas al mar ya se han visto afectadas en anteriores ocasiones durante eventos de temporal con alturas de ola importantes (p.e. línea de ferrocarril de Barcelona a Mataró (Figura 2.3), la autopista Pau Casals, la vía C-32 entre Sitges y Port Ginesta o la carretera N-340 a la altura de les Cases d'Alcanar).



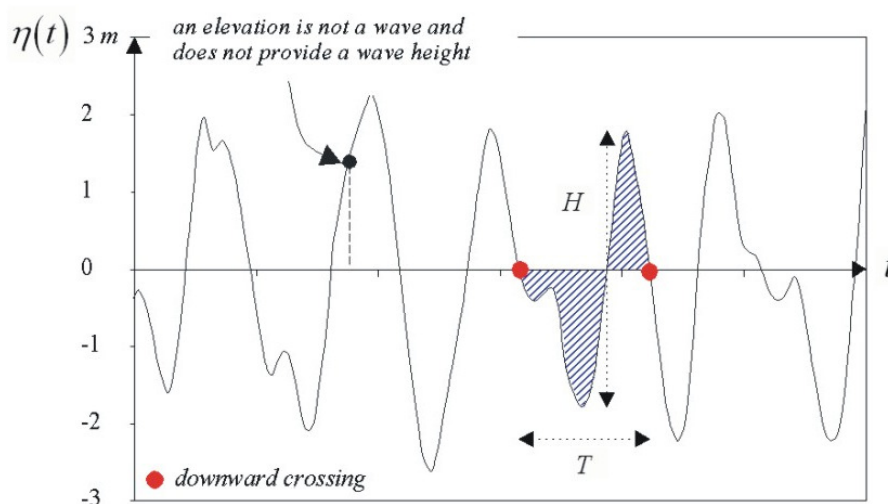
**Figura 2.2:** Daños en Malgrat de Mar (Barcelona) debidos al temporal de 2017



**Figura 2.3:** Línea R1 de ferrocarril a la altura de Mataró (Barcelona)

## 2.2. Definiciones

El oleaje se puede definir trivialmente como la oscilación vertical de la superficie del mar, aunque realmente hay que realizar una distinción entre la *elevación del nivel del mar* y la *ola*. En una serie temporal, la elevación del nivel del mar es una elevación instantánea de la superficie en relación a un nivel de referencia. En ese mismo intervalo de tiempo, la ola queda definida como el perfil de la elevación entre dos cruces consecutivos por el cero (el cero es la media de las elevaciones de la superficie) (Figura 2.4). Aunque la elevación puede ser negativa, la ola no lo será nunca.



**Figura 2.4:** Definición de altura de ola y periodo de ola en una serie temporal de elevación del mar [Holthuijsen, 2007])

Fundamentalmente las olas son generadas debido a la aportación de la energía del viento, pero éste es solo uno de los múltiples tipos de ondas de superficie libre que existen. Todos estos tipos de ondas se suelen ordenar por período o longitud de onda, que van desde las 24 horas para el oleaje *trans-tidal* hasta los 0.5 segundos para las olas capilares. El oleaje debido al viento suele mantenerse entre los rangos de 0.25 a 30 segundos para el período y longitudes de onda entre 0.1 y 1500 metros. Este oleaje se genera en la llamada zona de *fetch* y se denomina mar de viento (*wind sea*) ya que se caracteriza por no describir ninguna dirección concreta y ser bastante agitado. Una vez este oleaje sale de la zona de generación y empieza a propagarse hacia otras zonas se denomina mar de fondo (*swell*), y durante este proceso de propagación va sufriendo transformaciones de sus características debidas a factores externos, con los que se va regularizando a medida que avanza hasta estabilizarse en una dirección dominante.

Para caracterizar el oleaje se suelen utilizar diferentes parámetros estadísticos, que requieren de una serie temporal lo suficientemente corta para determinarse estacionarios, pero lo suficientemente larga para poder obtener valores fiables al calcular valores medios [Buckley et al., 1984], [Goda, 1986].

Se puede definir altura del oleaje (*wave height*) como la distancia vertical entre la elevación más alta y más baja dentro de una ola. Con un registro de  $N$  olas, la altura de ola media se define como

$$\overline{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.1)$$

Donde  $i$  es el número de la ola dentro de la secuencia. Aunque la definición sea obvia, no es muy utilizada debido a que se aleja del valor de altura de ola observada visualmente. El parámetro más utilizado en este caso se trata de la altura de ola significativa (*significant wave height*), definida como la altura media del tercio más alto de olas [Sverdrup, 1946]:

$$H_{1/3} = \frac{1}{\frac{1}{3}N} \sum_{j=1}^{\frac{1}{3}N} H_j \quad (2.2)$$

En este caso,  $j$  no corresponde al número de ola dentro de la secuencia, sino al número de ola según la ordenación basada en su altura.

De igual manera, se puede definir el periodo  $T$  como el intervalo de tiempo entre el inicio y el fin de la ola (el intervalo entre el primer cruce con el cero y el segundo). Como este periodo de ola se define por los cruces con el cero, se denomina período cruce por cero. Análogamente con ejemplo de la ola, el período medio se define como

$$\overline{T_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0,i} \quad (2.3)$$

Donde  $i$  es el número del periodo dentro de la secuencia. A colación se puede definir el período significativo de ola, como el periodo medio del tercio más alto de las olas.

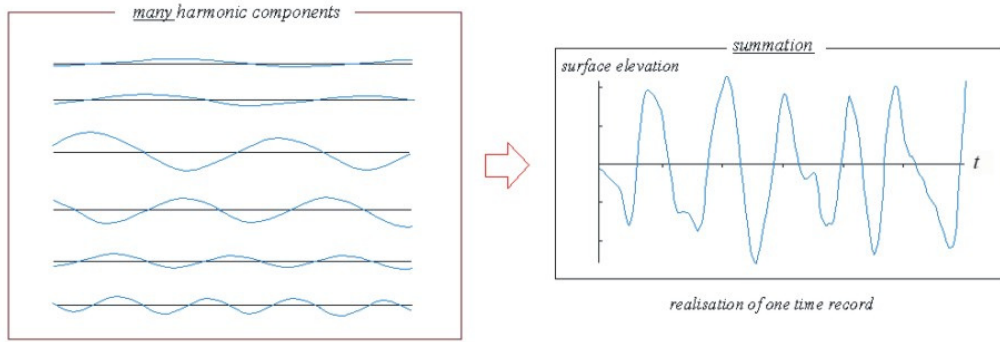
$$T_{1/3} = \frac{1}{\frac{1}{3}N} \sum_{j=1}^{\frac{1}{3}N} T_{0,j} \quad (2.4)$$

Nuevamente,  $j$  no corresponde al número de la secuencia sino al orden del periodo según la altura de ola. Para poder describir correctamente el oleaje a corto plazo, es necesaria cierta estacionalidad estadística, y para un estado de oleaje concreto se necesita que la serie temporal sea lo más corta posible. De todos modos, para caracterizar el oleaje siempre se requiere que la media se obtenga de un registro lo más largo posible, con lo que normalmente se adopta un intervalo de 15 a 30 minutos. En caso de ser mayor, se subdivide en segmentos menores que serán tratados como estacionarios individualmente.

Si se expresa la altura de ola como una amplitud, y el período como una frecuencia, se puede caracterizar de una manera más precisa el oleaje, aproximando la serie temporal como la suma de múltiples olas armónicas más simples (Figura 2.5). Esto forma el modelo de distribución aleatoria de amplitud y fase que puede escribirse como la serie de Fourier:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (2.5)$$

Donde  $a_i$  y  $\alpha_i$  son la amplitud y la fase, respectivamente, de cada frecuencia  $f_i$ .



**Figura 2.5:** Suma de olas armónicas, con amplitudes y fases constantes pero aleatorias, formando un estado aleatorio de oleaje [Holthuijsen, 2007]

Para la mayoría de registros de oleaje, las fases siempre tienen algún valor entre 0 y  $2\pi$  sin tener preferencia por alguno de los valores siempre que nos encontremos en aguas profundas, por lo que únicamente el espectro de la amplitud  $a_i$  será el que realmente caracterice el oleaje. Aun así, es más interesante expresar la amplitud en términos de su varianza, que corresponde al valor estadístico obtenido con:

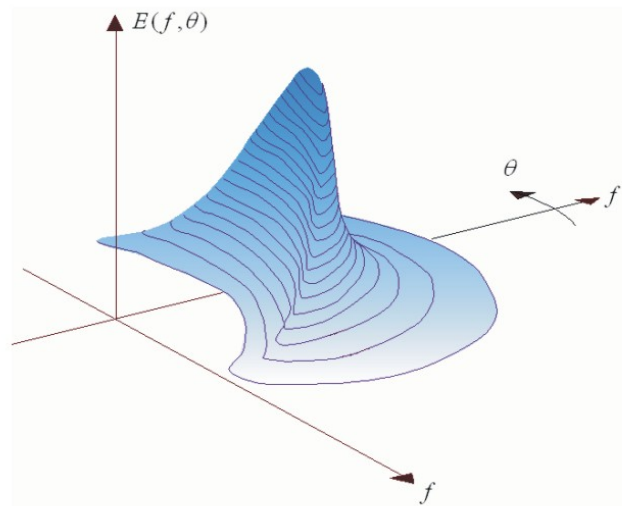
$$\text{varianza} = \bar{\eta^2} = \sum_{i=1}^N E\left\{\frac{1}{2}a_i^2\right\} \quad (2.6)$$

La varianza de la amplitud está directamente relacionada con la energía de las olas ya que es proporcional a ésta, con lo que obteniendo la varianza se obtienen propiedades físicas del oleaje como la velocidad de las partículas y las variaciones de presión. El espectro de la varianza es discreto y sólo una porción de las frecuencias  $f_i$  están representadas, a pesar de que todas las frecuencias se encuentren en el mar. Para resolver este problema, se distribuye la varianza a lo largo del intervalo de frecuencias  $\Delta f$ , asignando una densidad a cada una de ellas  $\frac{1}{2}a^2/\Delta f$  para lograr que todas las frecuencias estén incluidas. Entonces, se puede definir el espectro de la densidad de la varianza como:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} E\left\{\frac{1}{2}a^2\right\} \quad (2.7)$$

A partir del espectro de la densidad, se puede extender a un modelo tridimensional de oleaje, correspondiente a la suma de un gran número de olas armónicas estadísticamente independientes entre ellas, que se propagan en todas las direcciones por la superficie del mar. Este es el denominado el espectro de oleaje (*frequency-direction spectrum*) (Figura 2.6), que se define a partir de la frecuencia  $f$ , las direcciones  $\theta$  y el espectro de la densidad:

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta \theta} E\left\{\frac{1}{2}a^2\right\} \quad (2.8)$$



**Figura 2.6:** Espectro bidimensional de oleaje generado por viento (en coordenadas polares) [Holthuijsen, 2007]



## 2.3. Copernicus Marine Environment Monitoring Service

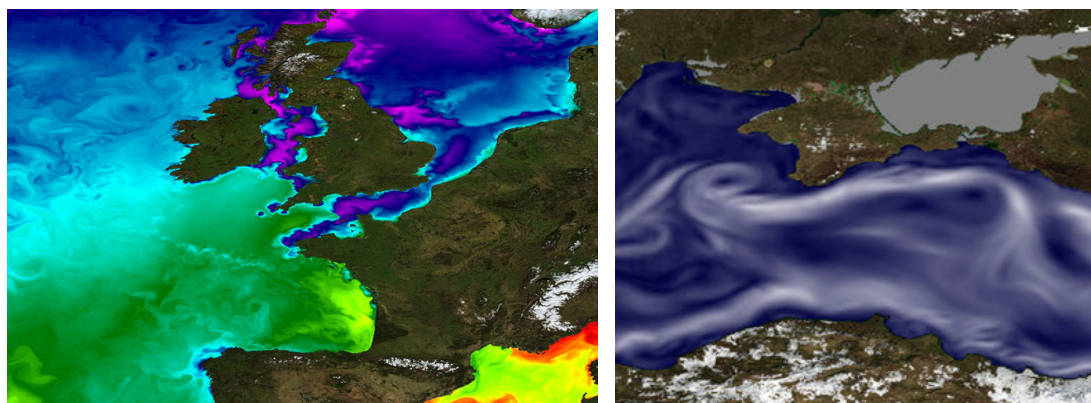
En el Tratado de Lisboa del año 2007, la Unión Europea ratificó sus intenciones de disponer de una política espacial propia y impulsar programas espaciales, de lo que surgió el programa GALILEO de navegación como alternativa al GPS, y el programa COPERNICUS de monitorización del planeta.

Dentro del programa COPERNICUS (anteriormente GMES) se crearon las diferentes áreas temáticas como la de *Marine Monitoring* dedicada a la observación marítima, y se iniciaron diferentes programas de investigación para desarrollar los futuros productos. Mediante los proyectos MyOcean (2009-2012) , MyOcean2 (2012-2014) y MyOcean (2014- 2015), se pusieron a prueba los procedimientos planteados y finalmente en el año 2015 se pasó a la fase operacional, creando el *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* [Copernicus, 2017] tal y como se conoce actualmente.

La organización del CMEMS está basada en una fuerte asociación con alrededor de 50 centros de investigación marítima europeos, que proveen regularmente información de referencia sobre el estado físico, el estado variable, la dinámica de los océanos y los ecosistemas marítimos a una escala global y también de manera regional (Figura 2.7).

Esta capacidad acoge la descripción de la situación actual (análisis), la predicción de la situación a algunos días vista (predicción) y la alimentación de datos de manera retrospectiva de años recientes. Las misiones de CMEMS incluyen:

1. Observaciones, monitoreo e informes a tiempo pasado y a tiempo presente de las condiciones marítimas, en particular, la respuesta de los océanos al cambio climático y otras agresiones
2. Análisis y interpretación de los cambios y tendencias en las observaciones y mediciones del entorno marino
3. Provisión de predicciones a corto plazo y observaciones de las condiciones marítimas, con objetivo de producir servicios de alerta o respuesta rápida ante eventos extremos o peligrosos



**Figura 2.7:** Ejemplos de productos ofrecidos por CMEMS: niveles de clorofila en los océanos y campos de viento (Mercator Ocean/CMEMS)

4. Provisión de descripciones detalladas del estado del océano, su variabilidad para iniciar los modelos acoplados océano-atmósfera que permitan predecir cambios en el clima

CMEMS provee una respuesta sostenible a los usuarios europeos en cuatro grandes áreas: (i) seguridad marítima, (ii) recursos marítimos, (iii) entornos costeros y marítimos y (iv) meteorología, predicción estacional y clima. Actualmente provee servicios diarios a más de 5000 usuarios en todo el mundo. Estos usuarios incluyen instituciones nacionales, universidades y el sector privado, así como instituciones europeas y cuerpos, agencias y convenciones intergubernamentales como EEA, ECMWF, HELCOM, REMPEC, UNEPMAP, el Consejo Ártico y la Comisión del Mar Negro [Copernicus, 2017].

Uno de los mayores objetivos del proyecto es de entregar y mantener un servicio a la orden del día y competitivo que corresponda a las necesidades tanto de los usuarios públicos como privados. El servicio incluye tanto datos de sensores in situ como de satélites, preparados por los Thematic Assembly Centres (TACs) y productos de modelado y asimilación de datos preparados por los Monitoring and Forecasting Centres (MFCs). Todos ellos se elaboran con datos y técnicas de modelado de vanguardia, y se acceden mediante un catálogo en línea (Figura 2.8) donde se elige el medio de obtención.

Los productos se describen en guías de usuario (Product User Manuals, PUMs), y se usan técnicas de verificación y validación internacionalmente reconocidas [Hernandez et al., 2015]. En cada actualización de los sistemas de producción (de los TACs o de los MFCs) la calidad de cada uno de los productos se monitorea mediante revisiones regulares y verificaciones rutinarias, y se generan unos Quality Information Documents (QuIDs) que detallan dichas verificaciones y estiman la calidad y precisión de los productos revisados.

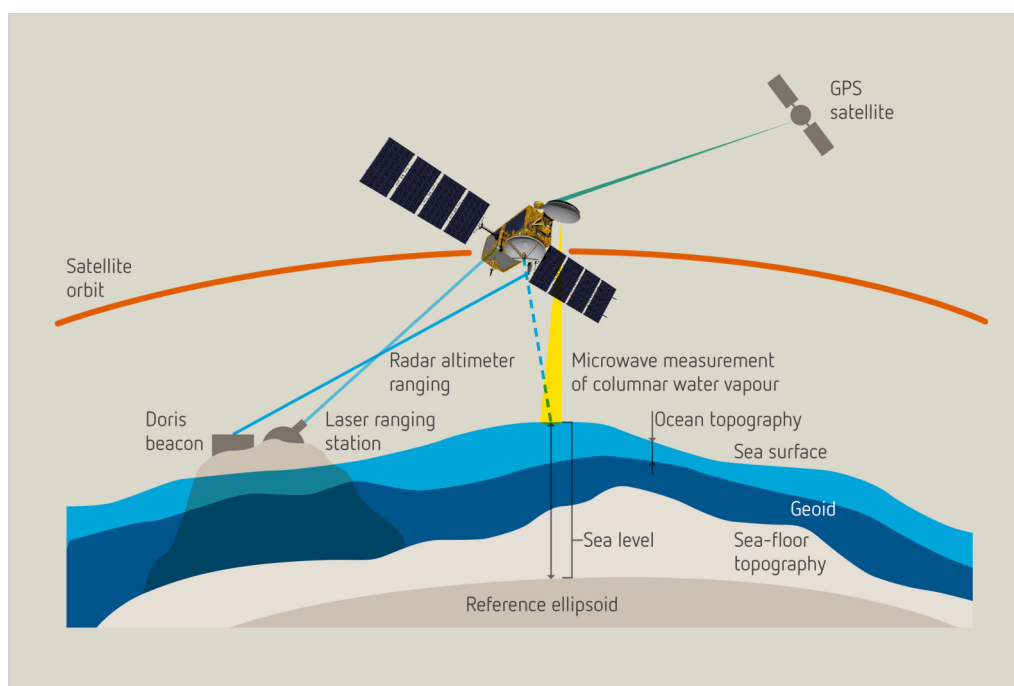


Figura 2.8: Catálogo de productos del CMEMS [Copernicus, 2017]

## 2.4. Observaciones de oleaje

### 2.4.1. Satélites

Los satélites altimétricos utilizados en la observación oceanográfica, cuya órbita se dibuja entre los 800 y los 1300 km de altitud respecto a la Tierra, están equipados con altímetros, que envían un pulso en la dirección del nadir y registran cuanto tiempo tarda la señal en volver al satélite tras haber rebotado en el océano (Figura 2.9). Conocida la órbita del satélite, es posible calcular la elevación de la superficie del mar.



**Figura 2.9:** Esquema del funcionamiento del satélite Jason-3 (ESA)

El primer altímetro fue instalado en la primera estación espacial estadounidense *Skylab* en el año 1973, y más tarde se le añadió el satélite *SEASAT* en 1978. Este último fue el primero puramente con fines oceanográficos, pero aun así, estos altímetros no permitían detectar cambios en el nivel del mar con la precisión suficiente para estudiar el cambio climático o la circulación marina, sólo cambios debidos a grandes accidentes geográficos submarinos. No fue hasta el año 1992 que se lanzó el *TOPEX/POSEIDON* fruto de una colaboración entre Estados Unidos (NASA) y Francia (CNES). Este fue el primer satélite equipado con un altímetro de precisión y permitió conocer que el nivel del mar había aumentado 3,2 milímetros en los últimos 25 años. Esta serie de datos ha tenido continuidad gracias a los satélites *Jason 1* (2001), *Jason 2* (2008) y por último *Jason 3* (2016). Ahora estos satélites cubren las mismas zonas pero con un período de cinco días, lo que duplica la resolución temporal de misiones anteriores [Lozano, 2017].

En todas las misiones de satélite de la última década, los valores de las observaciones se han calculado a partir de un geoide conocido y la órbita del satélite. Para poder conseguir la máxima precisión posible en los cálculos, a partir del lanzamiento de *TOPEX/POSEIDON* se incorporó el

sistema *Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite (DORIS)*. Este sistema consta de una serie de 60 estaciones fijas en la Tierra que se comunican con los satélites para corregir el cálculo de su órbita. Está basado en el efecto Doppler, donde la frecuencia de una señal emitida no es igual a la frecuencia de la señal recibida cuando se está en movimiento, y así se consigue corregir el cálculo de la velocidad relativa del satélite. Gracias a este sistema se consiguió reducir el error en el cálculo de la órbita hasta escalas de pocos centímetros.

Aunque la serie de satélites *Jason* ya permiten medir la topografía de la superficie del mar a escala centimétrica, actualmente se está trabajando en la misión *Surface Water Ocean Topography (SWOT)* [Srinivasan, 2017]. Este nuevo proyecto, también fruto de colaboración entre la NASA y el CNES, permitirá estudiar la superficie del océano a una escala 10 veces mayor que los satélites actuales, lo que dará a cabo poder obtener datos sobre los procesos de circulación marina cerca de la costa y también conocer los niveles de volumen de agua embalsada o de los ríos, siempre y cuando se encuentren entre los 50 y los 100 metros de longitud transversal. Su lanzamiento está planeado para 2021 [Lévesque, 2018].

Además de las colaboraciones anteriormente mencionadas, en 1998 se creó un programa puramente europeo de observación y monitoreo del planeta fruto de un acuerdo entre la Comisión Europea y la ESA, dentro del programa *Copernicus*. En este nuevo proyecto se planeó el lanzamiento de la familia de satélites *Sentinel*, de los cuales en la actualidad ya hay cinco de ellos puestos en órbita y le esperan otros veinticinco satélites, cada uno destinado a un campo de estudio diferente. De estos nuevos satélites, los que incorporan instrumentos de medida altimétrica son los *Sentinel-1* (2014) y *Sentinel-3A* (2016), pero funcionan de manera ligeramente diferente que los anteriormente mencionados *Jason*. Los satélites *Sentinel* llevan incorporado un radar de apertura sintética *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, que emiten una serie de pulsos consecutivos de microondas, reciben una serie de ecos y los combina de manera que se genera una observación en la que se puede determinar la rugosidad de la superficie. A partir de dicha rugosidad se consigue deducir la altura de ola del punto observado.

A continuación se mencionan las misiones utilizadas en esta tesina.

### 2.4.1.1. Jason 3

Los lanzamientos de las misiones altimétricas *TOPEX/POSEIDON* (1992), *Jason 1* (2001) y *Jason 2* (2008) fueron elementos clave en la oceanografía física ya que se superaron las especificaciones iniciales en términos de precisión, y también sirvieron para entender de un modo mejor el modelado de las corrientes oceánicas y su impacto en el clima. El éxito de la misión *TOPEX/POSEIDON* fue debido a la correcta calibración y optimización de los instrumentos de a bordo y del cálculo de los parámetros de la órbita.

*Jason 1* se lanzó para imitar, en términos de precisión, a su antecesor, pero logrando mejoras en el peso y el consumo de la nave, y en consecuencia, un menor coste económico de la misión global. *Jason 2* continuó mejorando los resultados de las dos misiones anteriores, especialmente su trazabilidad, y logró la continuidad de la toma de datos. La misión *Jason 3* sigue los pasos heredados de la familia y tiene como objetivos continuar aportando mediciones de alta calidad para estudios oceanográficos y generar productos para asimilación y predicción de manera operacional [J.P. Dumont et al., 2017].

*Jason 3* tiene un peso de aproximadamente 510 kg, y fue lanzado el 17 de enero de 2016 desde la *Vandenberg Air Force Base* en California (USA), a bordo de un cohete *Falcon 9*. Como instrumento principal lleva incorporado el altímetro *Poseidon-3B*, y como instrumentos de apoyo le siguen un radiómetro de microondas, un sistema *DORIS*, un receptor *GPS* y un reflector láser (Figura 2.10). Como instrumentos experimentales, carga un detector de radicación *CARMEN-3* y un telescopio detector de partículas de luz *Light Particle Telescope (LTP)* ambos aportados por el CNES. Tiene un ciclo de 10 días [NASA, 2017].

El altímetro *Poseidon-3B* opera en doble banda (13.575 GHz y 5.3 GHz) y es un instrumento creado a partir del altímetro que se equipó en *Jason 2*. Dispone de una antena parabólica de 1.2 metros de diámetro para emitir los pulsos.



Figura 2.10: Jason 3 (NASA)



#### 2.4.1.2. Sentinel 3A

La ESA había lanzado los satélites de la serie *European Remote Sensing*, *ERS-1* (1991-1996) y *ERS-2* (1995-2003), que viajaron en la misma órbita con el objetivo de tomar diferentes mediciones del planeta (imágenes radar, altímetro, campos de viento y temperatura de los océanos) con los que estuvieron aportando datos durante dos décadas. Después de estas misiones lanzó su sucesor *Envisat* (2002-2012), que con 10 instrumentos de medición y 8000 kg de peso logró ser la mayor misión con fines civiles de la historia. Con la experiencia de estas misiones y dentro del programa *Copernicus* ya mencionado, la ESA desarrolló el satélite *Sentinel-3A* tomando como base las tecnologías utilizadas en los instrumentos de *Envisat* [ESA, 2017].

*Sentinel-3A* pesa alrededor de 1200 kg, y fue lanzado el 16 de febrero de 2016 desde el *Site 133* en Mirny (Rusia) a bordo de un cohete *Rokot-KM* (Figura 2.11). Como instrumentos tiene equipados un radar de apertura sintética *Synthetic Aperture Radar* (SAR) de doble frecuencia, un radiómetro para obtener imágenes *SLSTR*, un espectrómetro *OLCI*, un radiómetro de microondas *MWR*, un receptor *GNSS* para obtener la localización, un retroreflector láser *LRR* y un sistema *DORIS*. Tiene un ciclo de 27 días [Mecklenburg, 2017].



**Figura 2.11:** Satélite Sentinel 3A (ESA)

### 2.4.1.3. SARAL/AltiKa

La misión *SARAL/AltiKa* nace fruto de una colaboración entre la CNES francesa y el ISRO indio, enfocado a la observación medioambiental. Fue planteada para cubrir la brecha entre el anterior satélite *Envisat* y *Sentinel 3A*, apoyada por *Jason 2* [CNES, 2018].

La nave, que fue diseñada por la agencia espacial india, carga de dos instrumentos independientes, el *Argos-3* y *AltiKa*. El primero corresponde a un receptor del sistema Argos de tercera generación, donde se reciben diferentes señales de cualquier plataforma de la red ya sean drifters, boyas y animales. El segundo instrumento corresponde a un conglomerado de altímetro, radiómetro y un sistema de posicionamiento DORIS.

La característica de este satélite reside en ser el primero que mide la superficie topográfica utilizando una muy alta frecuencia electromagnética de 35.7 GHz (al contrario de los 13.6 GHz de *Sentinel*), dando observaciones mucho más claras de líneas de costa, ríos y lagos.

*SARAL/AltiKA* fue lanzado el 25 de Febrero de 2013 desde el *Satish Dhawan Space Centre* en Sriharikota, India. Tiene un ciclo de 35 días [ISRO, 2018].

El uso de este satélite en la tesina quedará relegado como una misión de apoyo al resto de los satélites, ya que la muestra de datos disponibles es reducida.

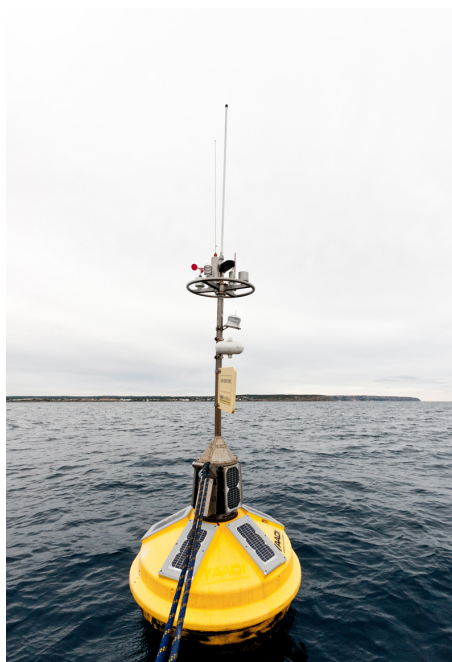
### 2.4.2. Boyas oceanográficas

Uno de los métodos más precisos para obtener datos sobre los fenómenos que se dan a cabo en el mar, junto a los sensores de presión, es el uso de boyas oceanográficas. La precisión y fiabilidad de dichos instrumentos viene justificada por la simple razón de estar en contacto físicamente con el medio que se está evaluando.

Las boyas (Figura 2.12) se encuentran ancladas en el fondo marino con un peso o ancla para poder mantener su posición, y se aprovecha el cable de anclaje para sostener cierta instrumentación que queda sumergida y complementa a los instrumentos en superficie, como los correntímetros, sensores de temperatura y de conductividad.

La instrumentación en superficie es la más relevante a nivel de oleaje. Además de una estación meteorológica, dispone de tres acelerómetros que miden los movimientos que se producen en todos los ejes, un giroscopio para conocer los cambios de dirección a lo largo del tiempo y una brújula *fluxgate*. Aunque la boya también se desplace horizontalmente, normalmente se desprecian estos movimientos, que, sumados al gran tamaño de la boya, suelen afectar a las observaciones creando series temporales con crestas suavizadas que tienden a subestimar alturas de ola en olas cortas [Holthuijsen, 2007].

Para poder transmitir la información almacenada, en la parte flotante se ubican los diferentes componentes de comunicación para trasladar los datos a estaciones en tierra o estaciones satélite.



**Figura 2.12:** Boya oceanográfica [Bengt Karlson et al., 2009]

Son múltiples los estados que, mediante diferentes organismos, mantienen redes de boyas oceanográficas distribuidas por todos los océanos del mundo. La mayoría de estas boyas están adscritas a alguna alianza donde se comparten datos, tales como Argos [Vassal, 2017], CMEMS o ESFRI [Sobczak, 2017], y se consiguen congregarse hasta 6500 instrumentos, incluyendo boyas y plataformas lagrangianas (gliders y drifters, instrumentos que se dejan a la deriva). En el mar Balear están a



la disposición las boyas pertenecientes a Puertos del Estado [Ministerio de Fomento, 2017] (Figura 2.13) y el SOCIB de las Islas Baleares, aunque no todas disponen de mediciones de oleaje ya que algunas están íntegramente dedicadas a parámetros químicos y físicos del mar.



**Figura 2.13:** Red de boyas pertenecientes a Puertos del Estado

## 2.5. El modelo SWAN

El modelado del oleaje para poder predecir alturas de ola, periodos y direcciones siempre han sido un tema de interés para los ingenieros civiles a lo largo de los años. Gracias a proyectos como el JONSWAP o los estudios de Hasselmann [Hasselmann et al., 1973] se pudo entender mejor la física que hay detrás de la generación y propagación del oleaje en los océanos.

Las estimaciones de los parámetros anteriormente comentados se pueden lograr mediante diferentes tipos de modelos, que utilizan datos de las condiciones meteorológicas (especialmente los campos de viento) para poder propagar el oleaje generado hasta las zonas costeras.

Estos fenómenos pueden ser reproducidos mediante dos tipos de modelos:

- *Phase averaging models*: modelos espectrales, no obtienen la evolución de la superficie del mar, pero sí la evolución de la energía del oleaje en cada celda del dominio estudiado. A estos modelos se les provee de valores estadísticos que representen el estado del mar a lo largo del tiempo, y tienen en cuenta la mayoría de procesos con lo que son aptos para dominios mayores.
- *Phase resolving models*: modelos deterministas, describen propiamente la forma de la superficie del mar, prediciendo la amplitud y fase de cada ola. Tienen en cuenta los procesos de difracción, reflexión y interacciones no lineales en aguas someras. Estos modelos sólo son aplicables en dominios muy pequeños, como por ejemplo el interior de puertos ya que no pueden abarcar la transferencia de energía entre la atmósfera y el mar, así que no se produce generación de oleaje.

Los primeros modelos espectrales se lograron mediante el uso de expresiones empíricas para obtener el crecimiento y la disipación del oleaje [Ewing, 1971], formando los denominados modelos de primera generación. Los de segunda generación llegaron tras haber integrado algunas parametrizaciones de las interacciones no lineales [Young, 1988],[Holthuijsen and Boer, 1988] para mejorar las estimaciones. Hasta mediados de los años 80 no llegarían los siguientes tipos de modelo (tercera generación) gracias a un grupo de investigación denominado *Wave Modelling Group (WAM)*, considerando que sería posible crear un modelo numérico que resolviera la ecuación de balance para oleaje generado por viento y que a su vez incluyera las interacciones no lineales [SWAMP Group, 1985].

Estos modelos de tercera generación no estaban adaptados a zonas costeras debido a que el coste computacional era demasiado elevado para escalas pequeñas, y algunos procesos costeros tampoco estaban implementados. No fue hasta la llegada del modelo SWAN cuando se introdujeron la mayoría de procesos que faltaban por incorporar y se adaptó el esquema numérico para que los cálculos fueran precisos en las zonas próximas a la costa. Hoy día la mayoría de modelos ya incorporan estas mejoras.

### 2.5.1. Base teórica

SWAN es un modelo de oleaje de tercera generación usado para obtener resultados realísticos sobre parámetros de oleaje en zonas costeras, lagos y estuarios a partir de una batimetría, un viento y unas condiciones de corriente dadas. Además, SWAN puede ser utilizado a cualquier escala relevante donde predomine la generación de oleaje generado por la acción del viento, ya que permite el anidamiento de mallas groseras a regiones más pequeñas con mallas finas.

Las simulaciones con SWAN están basadas en el espectro de oleaje ya que la oscilación de la superficie del mar en un punto dado está considerado como un campo irregular de ola. El modelo aproxima este campo irregular como la suma de diferentes olas regulares, con diferentes períodos y direcciones, representadas en el mencionado espectro de oleaje, que muestra la distribución de la densidad de energía frente las frecuencias y las direcciones de propagación.

La densidad de energía está cuadráticamente relacionada con la altura de ola, es directamente proporcional a la densidad del agua y también a la gravedad terrestre. Por lo tanto, las funciones de la densidad de energía activan los parámetros fundamentales de oleaje para ser descritos en un espectro.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.9)$$

No obstante, los modelos de oleaje determinan la evolución de la densidad en el espacio y el tiempo. La densidad de acción se define como:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E}{\sigma} \quad (2.10)$$

Donde  $\sigma$  se refiere a las distribución de frecuencias,  $E$  a la energía y  $\theta$  las direcciones de propagación. La densidad de acción es invariante aunque haya presencia de corrientes y aunque se produzca una propagación del oleaje, al contrario de lo que ocurre con la densidad de energía. Se puede definir la evolución de la densidad de acción gracias a la ecuación de balance de acción:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2.11)$$

La parte izquierda corresponde a la cinética de la ecuación. El segundo término muestra la propagación de la energía de ola en el espacio bidimensional. El tercer término representa el efecto de los cambios producidos por las variaciones en la profundidad y las corrientes, y el cuarto término representa los procesos de refracción.

La parte derecha de la ecuación muestra el término fuente densidad de energía, que representa todos los efectos que generan, disipan o redistribuyen energía:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,bd} \quad (2.12)$$

Donde  $S_{in}$  representa la transferencia de energía viento-ola,  $S_{nl3}$  y  $S_{nl4}$  las interacciones no lineales de energía entre olas (tríadas y cuádruples),  $S_{ds,w}$  la disipación por *whitecapping*,  $S_{ds,b}$  la disipación por fricción con el fondo y por último  $S_{ds,bd}$  la rotura inducida por el fondo.

### 2.5.2. Métodos numéricos

El modelo SWAN obtiene las soluciones mediante procesos iterativos donde cada paso de la iteración no coincide con la escala relativamente pequeña de tiempo en el espacio de frecuencia, así que se generan divergencias en los cálculos. Éstas se consiguen estabilizar limitando la densidad de acción. Cuando se modela oleaje en aguas costeras, los métodos explícitos de cálculo no son económicos en términos de coste computacional porque cada paso de tiempo es muy pequeño y consume grandes cantidades de tiempo. Esto es debido al criterio de Courant, que establece que la energía de ola no cruza más de una celda geográfica en un sólo paso, y implica que el método implícito de Euler se usa para discretizar la ecuación de balance de oleaje a lo largo del tiempo. De todas maneras, para la discretización en el espacio se utiliza una malla rectangular de tamaño constante.

Para los cálculos estacionarios SWAN usa por defecto el método de segundo orden SORDUP, aunque en zonas cercanas a contornos usa el método BSBT de primer orden. Este método se caracteriza por ser muy difusivo pero se asume que no es un problema severo al ser utilizado en distancias pequeñas. Finalmente, la discretización en el espacio espectral se lleva a cabo en intervalos iguales para la dirección, en una escala logarítmica de frecuencias donde se computa mediante un sistema híbrido tipo *central-upwind*.

### 2.5.3. Unidades

Todos los datos de entrada se asumen que están en unidades del Sistema Internacional: metros (m), kilogramos (kg), segundos (s) y todas aquellas derivaciones, como Newton (N) y Watios (W). De ese modo, la altura de ola y el período de ola se expresan en metros y segundos, y las energías se mostrarán en  $\text{Joule/m}^2$ . Para las direcciones de ola y viento, se puede escoger entre un criterio de signos cartesiana o náutica.

- Convención Cartesiana: la dirección hacia donde el vector indica, medida en sentido antihorario a partir del eje  $x$  positivo del sistema de coordenadas.
- Convención Náutica: la dirección desde donde el viento o el oleaje proviene, medido en sentido horario a partir del Norte geográfico.

Lo expuesto sólo se aplica para el oleaje y el viento, y en el caso de cualquier otra dirección (p.e. la orientación de la malla) se entra siempre mediante la convención Cartesiana.

### 2.5.4. Mallas computacionales y condiciones iniciales

En el funcionamiento de SWAN, se deben definir diferentes mallas para poder resolver el problema:

- Malla computacional espacial donde se realicen los cálculos, orientada arbitrariamente.
- Malla espacial de entrada de datos: campos de viento, batimetría, campos de corrientes, nivel de agua, fricción de fondo, vegetación o barro. El viento y la batimetría no necesitan ser entrados con malla si son uniformes en toda la superficie de interés.

- Malla espacial de salida, donde se escribirán los resultados calculados en cada uno de los puntos.

Si se escoge una malla computacional que sea rectangular y regular, la malla espacial de salida también deberá ser del mismo tipo, pero pueden ser completamente distintas en los tamaños y resoluciones. También se pueden utilizar mallas desestructuradas, que permiten cierta flexibilidad a la hora de escoger la malla de salida ya que podrá ser regular, rectangular o también desestructurada.

En SWAN se pueden anidar resultados de simulaciones previas provenientes de modelos distintos como WAM o WAVEWATCH III. En estos casos, SWAN se encarga de interpolar entre los contornos de la malla anidada y los puntos de la malla computacional que esté en uso. Como los campos de viento suelen estar disponibles en un intervalo temporal distinto al de las corrientes o niveles del mar, SWAN opera en diferentes ventanas de tiempo con distintos pasos de tiempo (*steps*). Se deberá especificar, de igual manera que lo ocurrido con las mallas, un intervalo de tiempo diferente para cada uno de los datos introducidos.

### **2.5.5. Limitaciones**

SWAN se puede utilizar a cualquier escala relevante para oleaje generado por viento. No obstante, está específicamente diseñado para aplicaciones en la costa que no requieran de grandes cambios en la escala. En ese caso, no hay ningún inconveniente en las computaciones ya que esta tesina se basará en escalas reducidas.

Se debe tener en cuenta que los procesos de difracción pueden dar a cabo un error de cálculo severo. Aunque SWAN use la aproximación de tipo *Phase averaging* para evitar gran parte del error, ésta no maneja de forma correcta la difracción ante obstáculos como puertos o elementos que creen una reflexión. Es obvio deducir que este tipo de elementos no están presentes en la malla computacional ni se tienen en cuenta para los cálculos, pero los resultados de la propagación del oleaje en estos puntos suelen ser los más interesantes cuando se determina la altura de ola máxima para el diseño. SWAN tampoco calcula corrientes inducidas entre olas, y en los problemas en 2 dimensiones, los cálculos se basan en ecuaciones aproximadas. De todos modos, las corrientes se pueden introducir como datos de entrada al modelo.



# Objetivos

El objetivo general de este estudio es el de analizar los datos de satélite de las misiones Sentinel 3A y Jason 3 para determinar si es posible su utilización como datos válidos de oleaje en la costa catalana y así poder mejorar mediante calibración y validación los parámetros de los modelos de predicción de oleaje allí. La oportunidad que brindan los satélites de obtener mediciones en múltiples puntos del océano ofrece un potencial a explorar por parte de los organismos dedicados a la predicción y investigación oceanográfica, y prueba de ello es la fuerte inversión que se está realizando en la última década tanto de partes privadas como de organismos públicos sobre los instrumentos satelitales. Para alcanzar dicho objetivo general se ha propuesto una serie de objetivos parciales:

- Obtención de observaciones de oleaje, tanto de satélite como boya, para todo el período temporal en el que se disponen datos de Sentinel 3A y Jason 3 proporcionados por el CMEMS (de Julio a Diciembre de 2017).
- Validación de los datos de satélite frente a los datos de boyas. Se toman estas últimas como valores de referencia, y se realiza un análisis estadístico para cuantificar la calidad de las observaciones de satélite. Representación de valores estadísticos con *scatter plots*, diagramas de Taylor y regresiones.
- Comparación de los valores generados por la predicción existente Medsea-Waves de CMEMS frente a las observaciones de satélite.
- Implementación de un modelo de oleaje de muy resolución basado en SWAN y anidado al modelo Medsea-Waves para la costa catalana.
- Validación y análisis de los resultados obtenidos con el modelo de alta resolución frente a las observaciones de satélite.
- Comparación entre ambos modelos.

Para poder realizar los trabajos anteriores ha sido necesario realizar, entre otras, las siguientes tareas:

- Definir el área de estudio, teniendo en cuenta la situación de las boyas existentes, las características de la batimetría (cañones) y las condiciones de contorno a imponer en el modelado.
- Entender el funcionamiento del modelo SWAN, desde su compilación hasta su puesta en marcha, para tener un control de las optimizaciones, la introducción de condiciones de contorno y solución de problemas surgidos durante las simulaciones.
- Obtener los datos de batimetría de la zona de estudio, acorde a la malla de alta resolución utilizada para intentar incluir todos los fenómenos de interacción con el fondo.
- Obtener los datos de campos de viento a la máxima resolución disponible, y aplicarlos al modelo SWAN.
- Programar multitud de código necesario para la obtención de datos, la representación cartográfica, el análisis estadístico y la generación de figuras.



---

<



# Materiales y métodos

## 4.1. Obtención de datos de oleaje

Como primera fase del estudio se ha propuesto la recopilación de todos los datos provenientes de mediciones con las que se realizará el análisis a posteriori. Para la zona de la costa catalana o Mar Balear y áreas subyacentes, existen diferentes fuentes de las que proveer estos datos, como pueden ser Ifremer, SOCIB, Puertos del Estado o el CNR. De todos modos, se ha decidido utilizar como fuente los servicios de Copernicus-CMEMS ya que se nos brinda una recopilación de datos de todos los anteriores organismos en un único sitio.

Los datos de CMEMS son gratuitos para todos los usuarios que se hayan registrado previamente al servicio. Es necesario estar de acuerdo con las condiciones del SLA, aportar detalles sobre la organización a la que pertenece el usuario y contestar varias preguntas sobre el uso de los datos. El proceso no es automático, sino que sólo tras una validación manual por parte del equipo de Mercator-Ocean se consigue la cuenta de usuario, que normalmente se obtiene a las 72h posteriores al registro.

La obtención de datos se puede realizar mediante dos métodos distintos:

- Interfaz web / Motu Rest API

Mediante el mismo sitio web de CMEMS, se accede a una especie de asistente donde se selecciona el producto, el rango espacial y el rango temporal de los datos a descargar. Con dicha información, se genera un archivo de texto tipo XML, que sólo puede interpretarse mediante una API llamada Motu, que funciona únicamente bajo el lenguaje de programación Python. Es necesaria una conexión a internet cada vez que se solicitan los datos, y también que el servidor de la API se encuentre operativo en el instante de la consulta, y a continuación se obtiene el fichero con formato NetCDF de los datos deseados.

- Vía FTP

Se realiza la conexión a un servidor mediante cualquier aplicación cliente FTP, y una vez conectado, es posible navegar libremente por las carpetas disponibles de todos los productos que disponga y descargar los archivos de interés. No se pueden descargar intervalos geográficos o temporales a menos que se usen las divisiones propias de los archivos (p. e., los archivos de boyas se encuentran disponibles separados por meses).

Es necesario tener constancia de la magnitud de los archivos que se van a descargar. Por ejemplo, el archivo de predicción de oleaje en su división mínima de 1 día suele tener un tamaño de alrededor de los 750 MB una vez descomprimido. Cabe recordar que cada archivo contiene toda una malla de puntos del mediterráneo con 24 valores (uno por hora) distintos, de la magnitud que contenga. Sin embargo, el mismo periodo en un archivo de datos de satélites apenas llega a los 70 kB ( 10.000 veces menor). Claro está que el archivo de satélites sólo contiene una traza lineal de puntos y el volumen es mínimo. De todas maneras, el protocolo de publicación de archivos hace que, en 200 días, tengamos solo 200 archivos de predicción y en cambio se publiquen 5000 archivos por satélite (10.000 archivos si contamos con J3 y S3A). Como veremos más adelante, esta división afecta negativamente al proceso informático de análisis ya que hay que ir abriendo, leyendo y cerrando muchos archivos, y es mucho más lento que leer consecutivamente un mismo archivo de mayor tamaño. Para el análisis de esta tesina han sido necesarios un total de 400 GB de espacio en disco necesario.

Hasta el 22 de marzo de 2018, debido a que cada uno de los productos se procesan en diferentes centros físicos diferentes (los llamados *Thematic Assembly Centres (TAC)*), también era necesario tener que realizar conexiones diferentes según el producto. Por ejemplo, los datos de boyas se preparan en el HCMR de Grecia, mientras que los análisis de predicciones los calcula la empresa CLR de Francia. Por el mero hecho de la distancia física, a la hora de realizar la obtención de datos mediante la red esto resultaba unas velocidades de descarga poco vanguardistas. Esto supone un problema para los usuarios que necesitan trabajar con intervalos temporales amplios (p.e. un año), en los que la descarga de datos se alarga a lo largo de diferentes días.

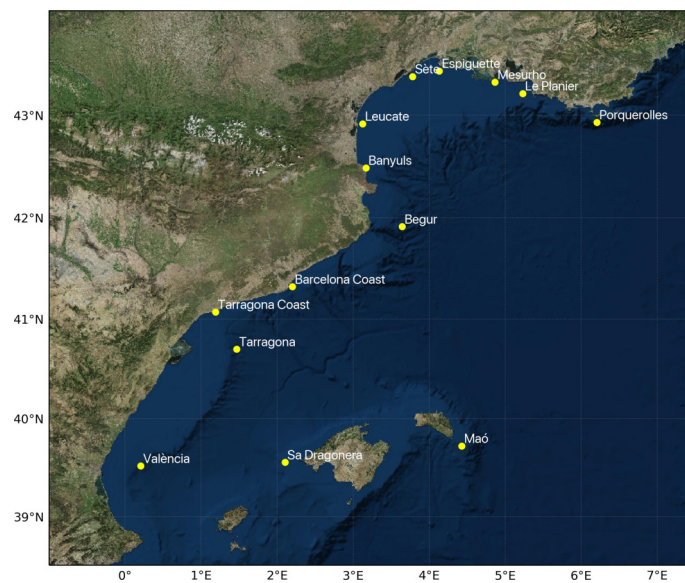
En consecuencia del *Service Release* del 22 de Marzo y 26 de Abril de 2018, se produjo un cambio en el servicio de distribución en el que todos los productos pasaron a estar disponibles en un único servidor en Francia propiedad de CLR, con lo que se ha mejorado la infraestructura y la descarga de datos se ha visto acelerada, mejorando la problemática de la lentitud aquí mencionada.

A continuación se detallan los productos CMEMS utilizados en esta tesina.

#### 4.1.1. Datos de boyas

En el servicio *Mediterranean Sea In-Situ Near Real Time Observations* encontramos la recopilación, de manera homogénea, de multitud de datos provenientes de diferentes fuentes in-situ tales como boyas (Figura 4.1), gliders, drifters o embarcaciones. Debido al amplio espectro de mediciones, los datos corresponden a puntos estáticos o bien a trazas para los elementos móviles como los gliders, que también varían su cota según la profundidad a la que viajan. Todos estos instrumentos incluyen variables tales como:

- Temperatura y salinidad
- Corrientes
- Nivel del mar
- Biogeoquímica
- Datos de oleaje



**Figura 4.1:** Boyas utilizadas en el proceso de validación de los satélites Jason 3 y Sentinel 3A

La arquitectura de estos datos se halla descentralizada mediante 7 regiones oceanográficas; la región Global y las 6 regiones pertenecientes a la alianza EUROGOOS (Figura 4.2). Cada región organiza sus actividades en función de su experiencia y antecedentes en el manejo de datos oceanográficos, pero todas implementan las funciones: (i) Adquisición de datos (ii) Control de calidad (iii) Validación de producto y (iv) Distribución de producto. Aun así, la función de distribución está centralizada por un único centro, y además la zona Global añade las zonas regionales como sistema de respaldo a los centros regionales.

Cada TAC es responsable del proceso de obtención, control de calidad y distribución de los datos (Figura 4.4), aunque se hace de manera sincronizada con una base de datos central compartida por todos los organismos. Cuando se publican los datos, éstos llevan asociados un nivel de calidad

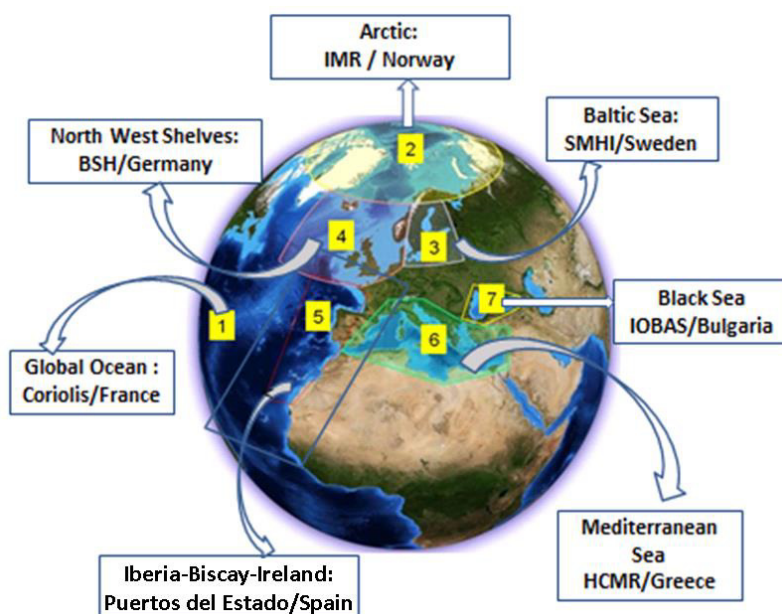


Figura 4.2: Centros In Situ TAC

o QC, *Quality Control flag* (Figura 4.3). Dependiendo del resultado de la validación, el TAC deja asignado a cada uno de los valores de la serie de datos el código correspondiente. Es importante remarcar que los niveles de validación más altos están aplicados a las series históricas de datos, porque han sido reprocesados más de una vez. Sólo se han utilizado datos in situ con QC 1 o 2.

Code	Meaning	Comment
0	No QC was performed	-
1	Good data	All real-time QC tests passed.
2	Probably good data	-
3	Bad data that are potentially correctable	These data are not to be used without scientific correction.
4	Bad data	Data have failed one or more of the tests.
5	Value changed	Data may be recovered after transmission error.
6	Not used	-
7	Nominal value	Data were not observed but reported. Example: an instrument target depth.
8	Interpolated value	Missing data may be interpolated from neighbouring data in space or time.
9	Missing value	An observation was performed, but it is not available

Figura 4.3: Tabla descriptiva de QC

Para obtener los datos mediante una conexión FTP, se accede a la estructura de carpetas que podemos ver detallada en el *Product User Manual* del servicio, donde se encuentran los directorios:

- *latest*. Contiene únicamente datos de los últimos 30 días, con carpetas creadas para cada día. Los datos tienen el nivel de validación más bajo pues aún no se le aplican los procesos de control de calidad posteriores.
- *monthly*. Contiene datos separados por plataforma (boya, glider, embarcación, etc) para series mensuales. Un directorio por cada mes, únicamente del último año.

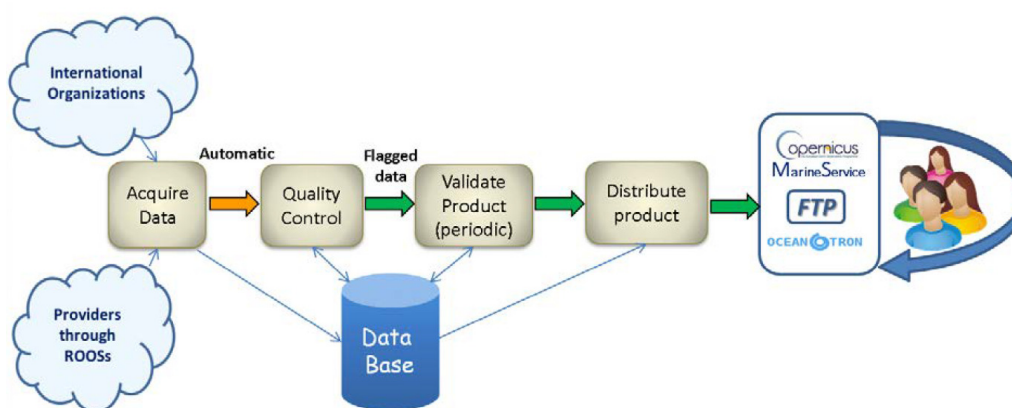


Figura 4.4: Proceso de generación de datos in situ

Organismo	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (m)	Dist. (km)
Cerema	Porquerolles	42.93	6.21	90	1.9
Cerema	Le Planier	43.21	5.23	70	9.1
Ifremer	Mesurho	43.32	4.87	17.5	1.8
Cerema	Espiguette	43.42	4.13	32	6
Cerema	Sète	43.37	3.78	30	6.3
Cerema	Leucate	42.92	3.12	40	5
Cerema	Banyuls	42.49	3.17	50	1.7
Puertos del Estado	Begur	41.92	3.65	1200	36
Puertos del Estado	Barcelona Coast	41.29	2.15	15	3.2
Puertos del Estado	Tarragona Coast	41.07	1.19	68	1.1
Puertos del Estado	Tarragona	40.68	1.47	688	57.6
Puertos del Estado	Valencia	39.52	0.20	350	41.8
Puertos del Estado	Dragonera	39.56	2.10	135	17.8
Puertos del Estado	Maó	39.73	4.42	300	16.8

Tabla 4.1: Características de las boyas utilizadas en el proceso de validación de satélites

- *history*. Contiene la serie histórica con todos los datos de la plataforma desde la fecha de inicio de la puesta en marcha del proyecto (1 de Enero de 2010).

Existen plataformas que ya no están en activo o que han sido substituidas por otras, y debido a la naturaleza acumulativa de dicho directorio, podemos encontrar multitud de localizaciones no actualizadas. No todas las boyas oceanográficas toman datos de oleaje, ya que existen algunos instrumentos dedicados a parámetros bioquímicos o meteorológicos; de este modo, para este trabajo se obtuvieron las series históricas de todas las boyas cercanas al mar Balear que contuvieran variables de oleaje.

### 4.1.2. Datos de satélites

Las observaciones de satélite, distribuidas mediante el *Global Ocean Along-track L3 Significant Wave Height From Altimetry Nrt*, pone a la disposición los datos altimétricos correspondientes a las misiones de los satélites Sentinel 3A (ESA) y Jason 3 (EUMETSAT-NASA) de toda la superficie terrestre.

A partir del mes de Marzo de 2018 se empezaron a incluir datos del satélite SARAL/AltiKa, aunque las primeras observaciones corresponden al Noviembre de 2017 y dejan un intervalo demasiado escueto como para poder analizarlo al igual que Jason 3 y Sentinel 3A. De todos modos, se han incluido datos de este último satélite como añadido a las otras dos misiones principales.

En estos archivos encontraremos datos de puntos de la superficie terrestre, separados en una resolución horizontal de alrededor de 7 km. Contienen la única variable de altura significativa de ola (ya que ha sido ligeramente procesada) y tras la preparación se van poniendo a disposición cada 3 horas como máximo, ya que se trata de un producto casi a tiempo real. Aun así, el intervalo medio de actualización es cercano a los 10 minutos, pero se va modificando a lo largo del día con iteraciones posteriores (Figura 4.5). Debido al dinamismo de las mediciones, este servicio provoca que el número de archivos sea muy alto y de tamaño pequeño, ya que cada archivo contiene como máximo 50 minutos de mediciones, y en sólo un día solemos encontrar aproximadamente 29 archivos por cada satélite.



**Figura 4.5:** Proceso de generación de datos de satélite

Como se realizan diferentes análisis para cada archivo, y estos se van substituyendo por versiones más recientes, al final del día se encuentran acumulados archivos con mayor y menor nivel de procesamiento en un único sitio. Por ello, se realiza una purga a nivel diario donde sólo se mantienen los últimos archivos con las versiones finales de cada procesamiento. Debido a la diferencia de órbitas y velocidades, los satélites tienen diferentes ciclos de paso, con lo que el número de archivos también depende de su posición física (Figura 4.6).

### 4.1.3. Datos de predicción

En el producto relativo a predicciones de oleaje en el Mediterráneo *Mediterranean Sea Waves Hindcast and Forecast* [G. Korres et al., 2017] se encuentra el resultado de la predicción de oleaje



producida por CMEMS para esta zona (Figura 4.7). Los datos están representados sobre una malla regular cuadrada de  $1/24^\circ$  o aproximadamente 4.6 km de resolución en los dos ejes cartesianos.

La predicción se genera a partir del modelo WAM Cycle 4.5.4 [Gunther H, 2012], que es una versión modernizada y mejorada del más conocido WAM Cycle 4 [Hasselmann et al., 1988]. Este modelo resuelve la ecuación de transporte de oleaje explícitamente sin ninguna presunción de la forma del espectro de oleaje. En sus términos fuente se incluye la entrada de campos de viento, la disipación por *whitecapping*, la transferencia no lineal y la fricción por el fondo [Komen et al., 1994]. El espectro de oleaje se discretiza a lo largo de 32 frecuencias (de 0.04 a 0.8 Hz) y 24 intervalos de direcciones (15 grados).

En la zona del Atlántico el modelo corre en modo de aguas profundas con refracción de oleaje únicamente debida a las corrientes. En cambio, para la zona del Mediterráneo, el modelo corre en modo de aguas someras considerando la refracción de oleaje debida al fondo y corrientes, adicionalmente a la rotura por fondo. Además, se asume que este último modelo tiene sus cuatro contornos cerrados sin propagación de energía de los mares adyacentes. Esta suposición, en combinación con el gran rango de cobertura del modelo del Atlántico no, afecta la propagación del oleaje tipo *swell* en el contorno abierto del modelo Mediterráneo por el estrecho de Gibraltar.

La batimetría proviene de los datos de GEBCO y ETOPO2, ambas provenientes del NOAA estadounidense. En ambas fuentes se ha aplicado una interpolación bi-lineal y se le ha aplicado un filtro Gaussiano para adaptarlo a la malla del modelo, con una resolución de 2 minutos. Al modelo también se le aplica la entrada de vientos del ECMWF a  $1/8^\circ$  de resolución. Primero se realiza una discretización con tamaño de malla de  $1/6^\circ$ , sobre la que luego se anida la malla fina para obtener el resultado final. Adicionalmente, como datos de entrada de corrientes se introducen los resultados de la predicción de CMEMS Med MFC V3 con  $1/24^\circ$  de resolución.

El sistema de predicción se ejecuta una vez al día, iniciándose a las 12h UTC, y simula las 24 horas anteriores (modo de simulación) y las 120 horas siguientes a la ejecución (modo de predicción) (Figura 4.8). Como cada proceso iterativo va reanalizando períodos anteriores, los últimos 5 archivos desde la fecha actual nunca son los definitivos, ya que las 144 horas anteriores a la actualidad se irán actualizando conforme avance el tiempo.

#### 4.1.4. Formato de archivos tipo NetCDF

Los archivos de datos oceanográficos utilizados se disponen mediante formato NetCDF *Network Common Data Form*, que es una interfaz orientada a archivos que contengan datos de forma matricial y incluye una librería para la implementación de dicha interfaz. Además, define un lenguaje independiente de la máquina y sistema operativo para poder manejar datos científicos [Ramamurthy, 2017]. El formato de archivos NetCDF tiene las siguientes características:

- Es autodescriptivo. Cada archivo contiene información sobre los datos que contiene
- Independiente de cualquier arquitectura. El archivo está representado de manera que pueda ser leído desde sistemas o ordenadores que almacenen de forma distinta los números enteros, caracteres o números decimales.

- De acceso directo. Es eficiente obtener una serie pequeña dentro de una serie gigante de datos, sin tener que leer la totalidad de ellos.
- Expandible. Se pueden añadir datos nuevos a una serie previa sin tener que copiar la serie desde cero o redefinir su estructura.
- Difundible. Puede ser escrito por un único autor y leído por múltiples usuarios que estén accediendo al archivo al mismo tiempo.

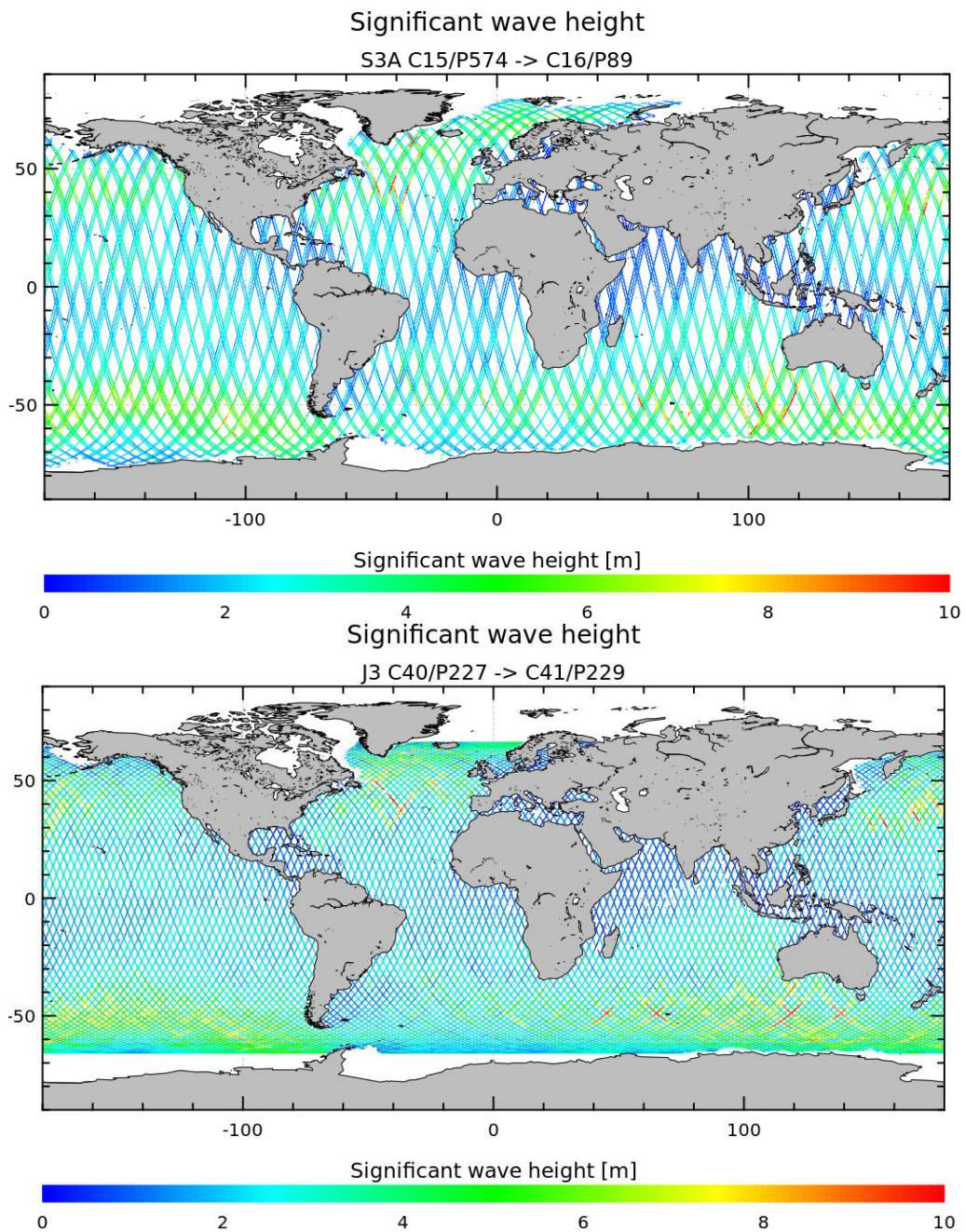


Figura 4.6: Comparativa de ciclos completos entre Sentinel 3A (27 días) y Jason 3 (10 días).

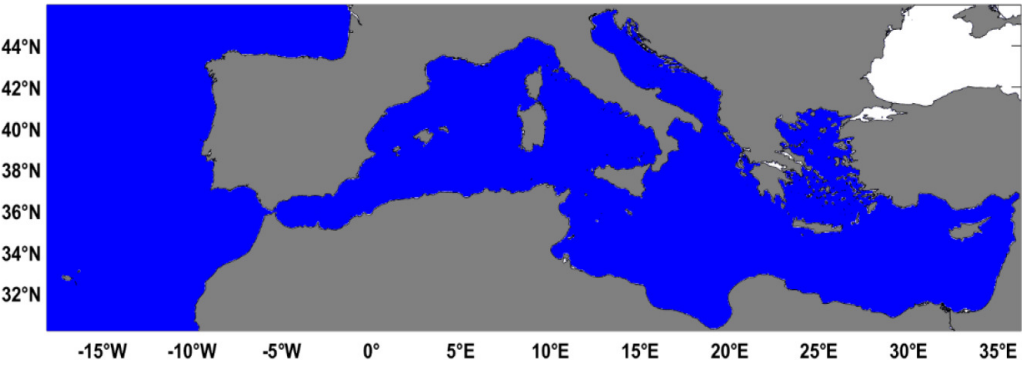


Figura 4.7: Dominio de la malla de la predicción Med-Waves de CMEMS

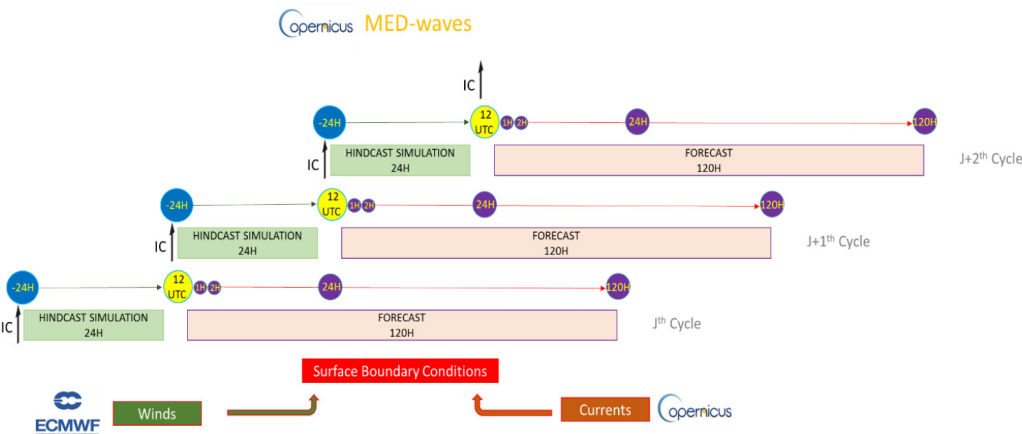


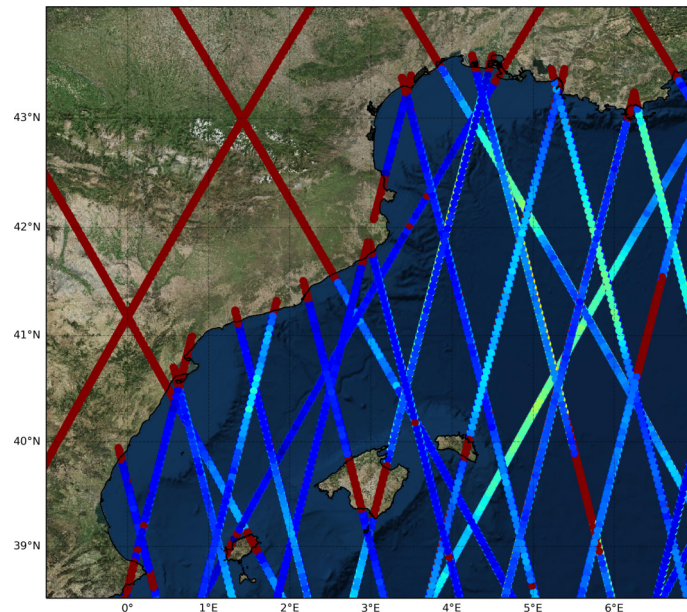
Figura 4.8: Proceso de generación de predicción de oleaje

## 4.2. Comparación de datos in situ

Para iniciar el estudio, se han tenido en cuenta los datos de 14 boyas establecidas en las zonas costeras próximas a Cataluña, de las que se obtienen las series de datos de altura de ola significativa ( $H_{m0}$ ). Como estos instrumentos se encuentran físicamente en contacto con el medio marino, se establecen como valores de referencia en análisis posteriores, donde se compararán con los obtenidos mediante las mediciones de los satélites y las predicciones calculadas con modelos (Figura 4.9).

El procedimiento de comparación entre valores se ha realizado mediante la llamada “colocación” [H Sepulveda, 2014]. Dicho método consiste en fijar un ámbito alrededor de la posición de la boya, ya sea en radio de distancia o en espacio temporal, por el que se toman como válidas todas las trazas de los satélites que lo crucen. En la presentación original el autor plantea utilizar un radio de 50km alrededor de la boya y una ventana de tiempo de 30 minutos, donde posteriormente se puede diseccionar entre los puntos más cercanos o realizar la media entre todos ellos.

En este trabajo, se ha obviado la ventana de tiempo, y la colocación se ha realizado únicamente bajo el criterio de la distancia. Para cada traza de satélite que su trayectoria entre dentro del Mar Balear, se ha establecido un radio de 50km alrededor de cada boya, donde todas las trazas de satélite que se encuentren a 50km o menos distancia entran dentro del rango de colocación (Figura 4.10).

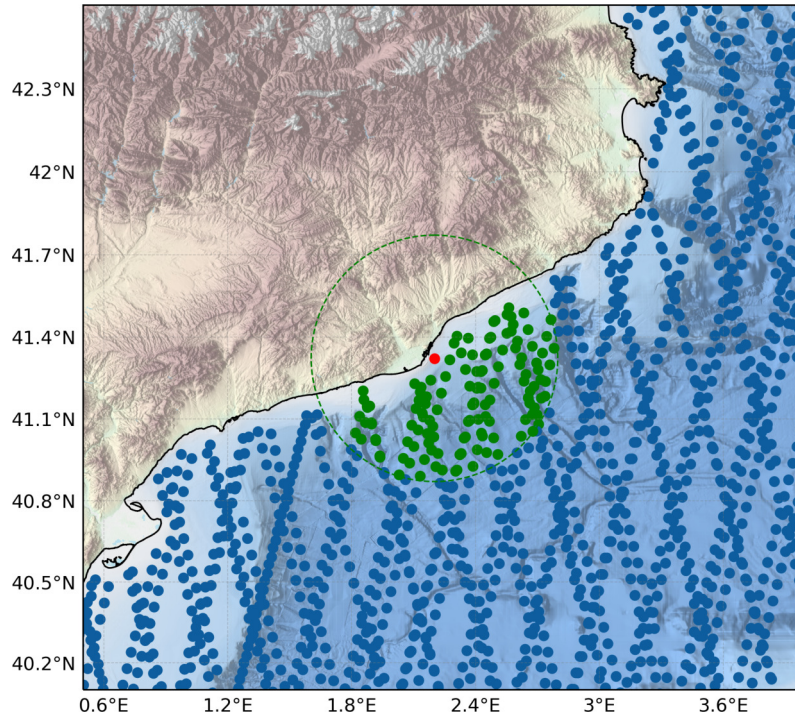


**Figura 4.9:** Trazas combinadas de los satélites Jason 3 y Sentinel 3A en el ámbito de estudio

Para evitar los casos donde las trazas de satélite cruzaban los radios de colocación de manera tangencial, se ha despreciado las trayectorias que formaban menos de 3 puntos dentro del radio. Del resto de trazas de satélite, se ha calculado la media aritmética, ponderada en relación a la distancia con un sistema de pesos.

Para determinar la validez de cada uno de los puntos, ha sido necesario calcular la distancia entre éstos y la posición de la boya. Se ha logrado utilizando la fórmula del haversine, o distancia





**Figura 4.10:** Ejemplo de colocación de trazas de satélite con la boya costera de Barcelona

de círculo máximo, que consiste en el cálculo de la mínima distancia entre dos puntos de la superficie terrestre, ignorando la orografía, descrita mediante el círculo máximo que los une. Dadas dos posiciones (dos pares de longitudes y latitudes), la distancia *haversínica* se determina como sigue:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) + \cos(lat_1) \cdot \cos(lat_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta lon}{2}\right) \quad (4.1)$$

$$c = 2 \cdot \arcsin(\sqrt{a}) \quad (4.2)$$

$$d = c \cdot R \quad (4.3)$$

Donde  $\Delta lat$  y  $\Delta lon$  corresponden a la diferencia de latitudes y longitudes entre puntos,  $lat_1$  y  $lat_2$  son las coordenadas de latitud de los puntos calculados y  $r$  corresponde al radio de la Tierra, donde se adopta 6371 km. Finalmente, el resultado  $d$  corresponde a la distancia en km entre los dos puntos.

Teniendo en cuenta la velocidad a la que se desplazan los satélites (alrededor de 6 km/s), en apenas un minuto logran recorrer toda la costa catalana, por lo que la colocación en una sola boya representa el análisis de múltiples puntos en un intervalo de tiempo muy corto. Una vez se obtienen todos los puntos, se determina un único valor como el resultado de la colocación. Este valor corresponde a la media aritmética de todos los valores tomados, ponderados según un peso dependiente de la distancia a la boya. Para obtener el peso de los valores se ha calculado:

$$c_i = \frac{1}{d_i} \quad (4.4)$$

$$p_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (4.5)$$

Donde  $d$  es la distancia hasta la boya,  $c$  es el coeficiente obtenido de cada valor y  $p$  el peso de dicho valor. Una vez obtenidos los pesos, la media ponderada se calcula con la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (4.6)$$

Donde  $x_i$  es el valor a ponderar con el peso  $p_i$ , y  $\bar{x}$  la media ponderada de toda la serie de valores.

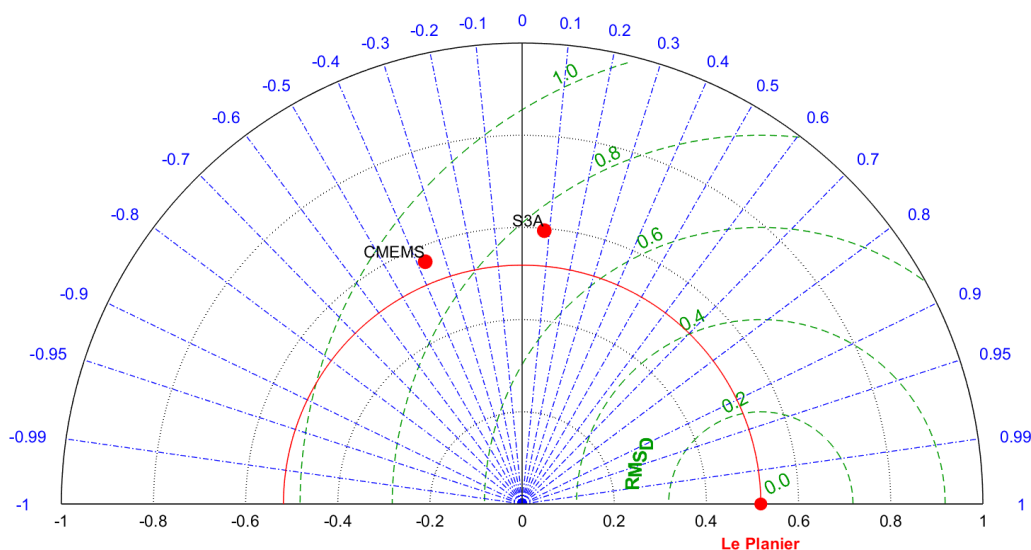
En el proceso de colocación, es necesario realizar iteraciones a través de los más de 20.000 archivos de satélite para determinar, a priori, si alguna de sus trayectorias entran dentro del ámbito de interés, para continuar con el cálculo de las distancias a la boya. Cabe destacar que, a pesar de la gran disponibilidad de observaciones de satélite, tan sólo una cuarta parte entra dentro del ámbito de estudio, y a su vez, para cada boya sólo se han podido analizar mediante la colocación entre 15 y 20 coincidencias.

### 4.3. Validación y análisis estadístico

Las mediciones de altura de ola, obtenidas mediante las boyas oceanográficas, consisten en una serie temporal de datos de la elevación de la superficie del mar en una posición fija. En cambio, las mediciones de altura de ola provenientes de los satélites muestran estas elevaciones a lo largo del tiempo y a lo largo de una traza sobre la superficie marina. La combinación de ambas observaciones permite una mejor visualización de la comparación a realizar.

La validación de los resultados de las diferentes simulaciones, y de la comparación entre los datos in situ y las predicciones, se han basado en representaciones de series temporales, diagramas tipo *scatter* (dispersión) y diagramas de Taylor.

El diagrama de Taylor [Taylor, 2001] es una representación gráfica donde interfieren tres variables. Se muestran el coeficiente de correlación ( $r$ ), el error cuadrático medio centrado (RMSD) y la desviación estándar de cada variable en un gráfico en dos dimensiones (Figura 4.11). Estos diagramas son muy útiles para presentar un análisis estadístico del resultado de diferentes modelos en comparación a los valores de referencia, ya que la mayor cercanía al valor real indicará un mejor rendimiento. El único inconveniente de los diagramas de Taylor radica en que los *bias* se eliminan cuando se calcula el RMSD centrado, y los resultados pueden no ser representativos en algunos casos concretos.



**Figura 4.11:** Ejemplo de diagrama de Taylor, donde se ha comparado la altura de ola entre la boya de Le Planier, la predicción de CMEMS y la observación del satélite Sentinel 3A. En este caso, el coeficiente de correlación adquiere valor negativo, por lo que hay un valor fuera del primer cuadrante.

Por estas razones, los valores estadísticos se han calculado aparte para poder realizar comparaciones cuantitativas. Principalmente se ha calculado el RMSD, el *bias*, el *scatter index* y el coeficiente de correlación, como sigue:

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4.7)$$



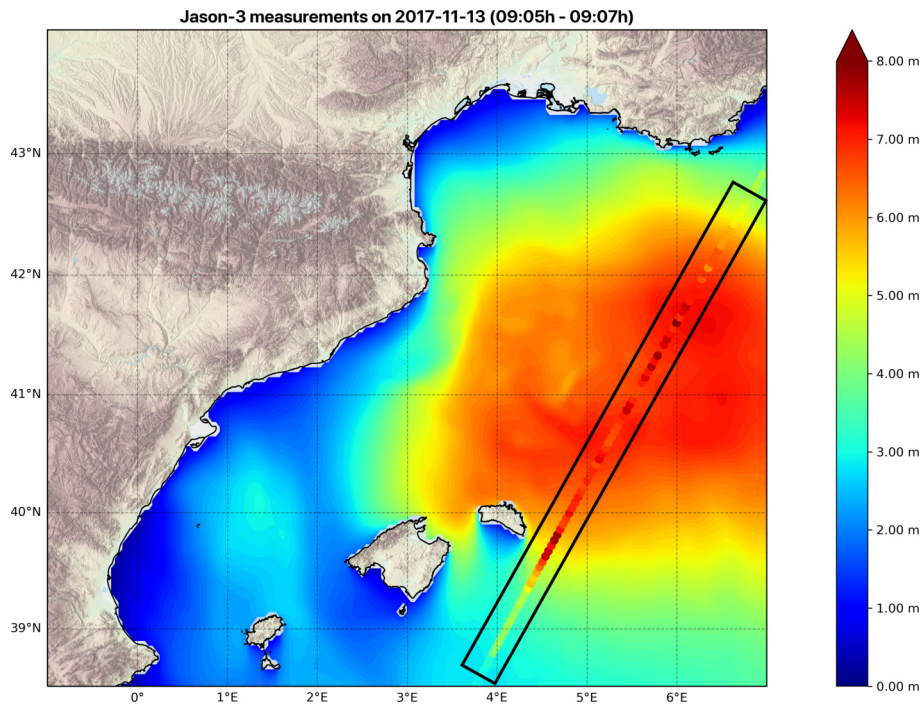
$$\text{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (4.8)$$

$$SI = \frac{RMSD}{\bar{y}_i} \quad (4.9)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.10)$$

Donde  $\hat{y}_i$  corresponde al valor calculado y  $y_i$  al valor de referencia.  $N$  es el número de puntos y  $\bar{y}$ ,  $\bar{x}$  los valores medios de cada variable.

Para analizar múltiples puntos, complementarios a la colocación mediante boya, se han analizado todos los puntos de las trazas de los satélites comprendidos entre unas longitudes y latitudes determinadas, con el fin de comprobar la respuesta de los modelos de predicción frente a las observaciones obtenidas. Este proceso consiste en la comprobación de las trazas de todos los archivos de satélite y la posterior comparación con la posición más próxima del nodo de la malla analizada (Figura 4.12).

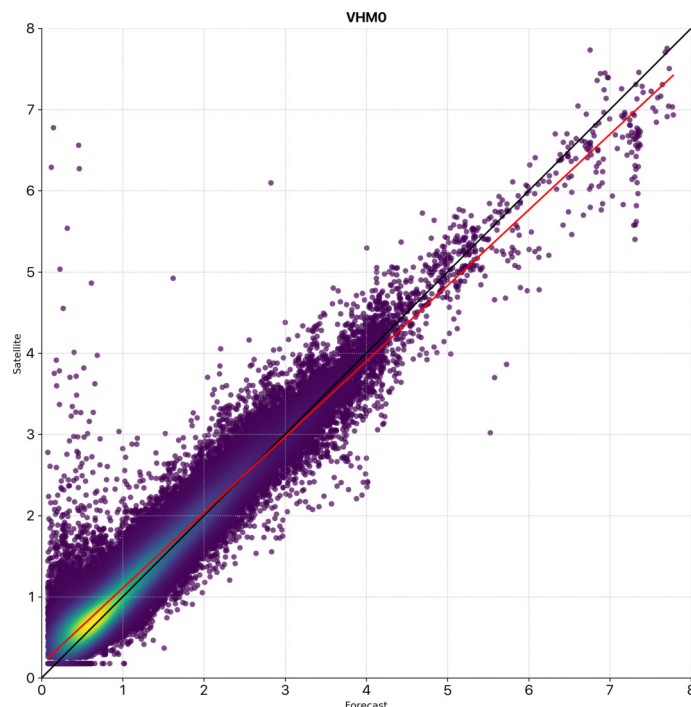


**Figura 4.12:** Mapa de altura de ola para el mar Balear en Noviembre de 2017. Los contornos pertenecen a la predicción CMEMS, con sobreposición de observaciones del satélite Jason 3.

Con este procedimiento se han generado diagramas de dispersión, para poder ver el orden de correlación entre valores. Una vez calculados los puntos, se ha calculado la densidad para poder representarlos en orden descendente para poder identificar las zonas con más presencia de observaciones (Figura 4.13). El orden de representación, además, está ordenado según la densidad de puntos, según Sobre esta dispersión se ha calculado una recta de regresión lineal (polinómica de primer grado), que responde a la ecuación:

$$y = \alpha + \beta x \quad (4.11)$$

Donde  $\alpha$  es el punto de intercepción con el eje de las abscisas y  $\beta$  la pendiente de la recta.



**Figura 4.13:** Ejemplo de diagrama de dispersión entre el valor de altura de ola observado por el satélite Sentinel 3A y el predicho por el modelo de CMEMS para todo el Mediterráneo en el período de Julio de 2017 a Mayo de 2018 (104000 observaciones)

#### 4.4. Modelado

El el cálculo de las simulaciones relativas al oleaje, se ha utilizado el programa *SWAN Cycle III version 41.20A*, de la *Delft University of Technology* de Delft, Países Bajos. Funciona en la mayoría de sistemas operativos (Linux, Windows, Mac OS, Solaris, etc.) gracias al uso del lenguaje estándar Fortran 90. Está programado de manera que se puede hacer un uso en paralelo y así poder realizar cálculos con diferentes procesadores para una misma tarea, y reducir drásticamente tiempos de cálculo, aunque también permite realizarlos en secuencial. Se puede utilizar en modo de 32 o 64 bits.

SWAN utiliza un único archivo con extensión \*.swn como archivo de entrada, donde se definen todos los parámetros del cálculo a realizar. Dentro de este archivo se deben definir la malla de cálculo, la batimetría, las condiciones de contorno y los parámetros que se deseen para poder ejecutar la simulación (Figura 4.14).

Para poder iniciar el programa, es necesario disponer del ejecutable correspondiente al sistema operativo en el que se vaya a dar a cabo la simulación. En esta tesina, se ha utilizado el *Servei de Càlcul intensiu TITANI* de la *Escola de Camins* de la UPC. Se trata de un clúster de alto rendimiento formado por un conjunto de servidores Dell, y un servidor de acceso externo. A este servidor de

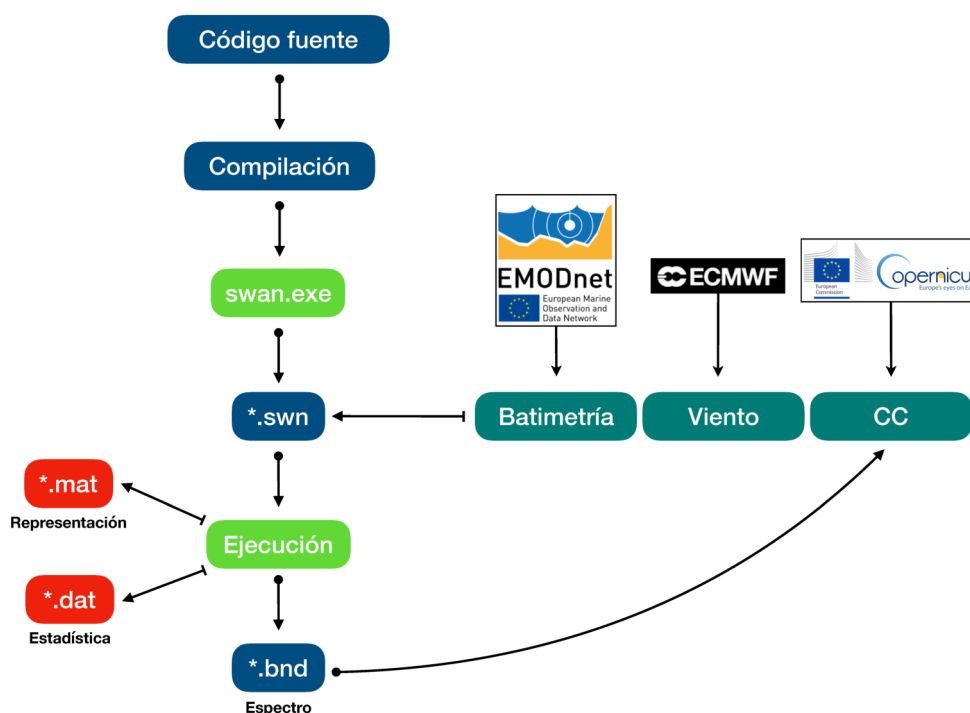


Figura 4.14: Proceso de ejecución del modelado

acceso es donde se permite que múltiples usuarios se conecten de manera remota y envíen las tareas a ejecutar en el clúster. Cada vez que un usuario envía una tarea, ésta se añade a un sistema de colas donde se irán procesando (ya en el clúster) las tareas según prioridad y duración de los cálculos.

El clúster está formado por 5 servidores Dell donde cada uno dispone de 2 procesadores Intel Xeon E5-2650L, 256 GB de memoria RAM y 450 GB de espacio en disco. Adicionalmente, los usuarios disponen de 10TB de almacenamiento extra mediante carpetas montadas en red, que no están físicamente dentro del clúster y el acceso para leer/escribir archivos es más lento, pues están destinadas a almacenar resultados de cálculos y otros archivos temporales.

Para acceder y controlar el equipo, es necesario encontrarse físicamente dentro de la red interna de telecomunicaciones de la UPC, o bien acceder desde un lugar cualquiera mediante el servicio *UPCLink* que permite una conexión VPN desde fuera de la universidad. Una vez establecida la conexión VPN, se han enviado a *TITANI* las instrucciones de comandos vía SSH con un programa como *PuTTY*, sin interfaz gráfica de escritorio. Para transferir archivos entre la máquina local y *TITANI* y para la descarga de archivos de CMEMS, se ha utilizado el protocolo FTP con el programa *WinSCP*.

#### 4.4.1. Preparación del entorno

*TITANI* funciona bajo la distribución Linux *CentOS*, por lo que se ha tenido que compilar *SWAN* en este entorno específico. El proceso de compilación de un programa consiste en traducir desde el código fuente en el que se ha programado hacia el código máquina en modo binario que es el que entiende y puede procesar el ordenador. *SWAN* se puede compilar de tres modos:

1. *serial*. Para cálculos en serie, donde el procesador sólo ejecuta una tarea al mismo tiempo y va procesando según la lista de tareas añadidas.
2. *parallel, shared*. Para cálculos en paralelo donde se comparta una misma tarea entre dos o más procesadores.
3. *parallel, distributed*. Para cálculos en paralelo donde las tareas son distribuidas entre varios procesadores y se realizan los cálculos de manera independiente entre ellos.

El modo *serial* se utilizó por última vez en sistemas de producción con el sistema operativo *Windows 98*, hace ya veinte años, por lo que puede considerarse obsoleto. Tanto el modo distribuido como el compartido son los métodos utilizados actualmente, aunque es de más extensión el método distribuido, por lo que se ha elegido este último para desarrollar este trabajo.

Según el manual de *SWAN* [The *SWAN* Team, 2018], para poder compilar correctamente en modo distribuido, es necesario que la máquina utilice las instrucciones del tipo *Message Passing Interface (MPI)*. Este tipo de compilación en *TITANI* puede realizarse con el compilador *mpif90* (GNU) o bien con *mpiifort* de Intel. Sin embargo, al intentar compilar el programa se ha obtenido un error donde no se puede finalizar el proceso ya que el código de *SWAN* no entiende algunos argumentos. Este error se ha tenido que resolver modificando el archivo original *platform.pl* y substituyendo el compilador por defecto por el deseado. Se ha comprobado que utilizando *mpiifort* el programa se puede compilar con éxito. La siguiente secuencia de comandos es válida para obtener y compilar el programa en *TITANI*:

```
wget http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swan4120.tar.gz
tar -xzf swan4120.tar.gz
cd swan4120
nano +219 platform.pl
# Substituir 'mpif90' por 'mpiifort'
make config
make mpi
cp -r 'swan.exe' /users/$USER
cp -r 'swanrun' /users/$USER
cd ../
rm -r swan4120
rm swan4120.tar.gz
chmod 777 swanrun
```

```
chmod 755 swan.exe
```

Tras la ejecución de las órdenes anteriores, dos archivos quedan listos en el directorio del usuario: “swan.exe” y “swanrun”. Ambos son los únicos e imprescindibles archivos necesarios para el funcionamiento del programa.

## 4.5. Condiciones iniciales

A continuación se describen todos los parámetros necesarios para las simulaciones ejecutadas en esta tesina. Se introducen mediante un archivo de texto con extensión \*.swn, que contiene todos los comandos que SWAN ejecutará. Los comandos se escriben por líneas, donde cada línea podrá tener una longitud máxima de 120 caracteres [The SWAN Team, 2018].

### 4.5.1. Comandos de inicio (*Start-up*)

Se debe establecer un nombre para el problema a resolver, y inicializar parámetros como el nivel, el modo (estacionario o no-estacionario) y el sistema de coordenadas. En este caso, se ha establecido el criterio de signos náutico, con el que las direcciones corresponden a un ángulo medido desde el Norte, indicando desde donde el viento o las olas provienen. También se ha establecido el modo no-estacionario, ya que tenemos un problema variable en el espacio y en el tiempo, y se han definido las coordenadas como esféricas (longitud y latitud).

```
PROJ 'Costa Catalana' 'Cat'  
SET NAUTICAL  
MODE NONSTATIONARY  
COORDINATES SPHERICAL CCM
```

### 4.5.2. Mallas, condiciones iniciales y física (*Model description*)

SWAN discretiza el dominio espacial en mallas computacionales, que pueden ser de tipo regular (cuadrícula) o desestructurada (nodos) [The SWAN Team, 2018]. Se pueden anidar entre ellas, por ejemplo para hacer una simulación a escala grosera con una malla regular y un segundo paso con una malla más fina para una zona concreta. Esto se consigue interpolando el espectro obtenido entre una y otra simulación en los puntos del contorno donde se anida.

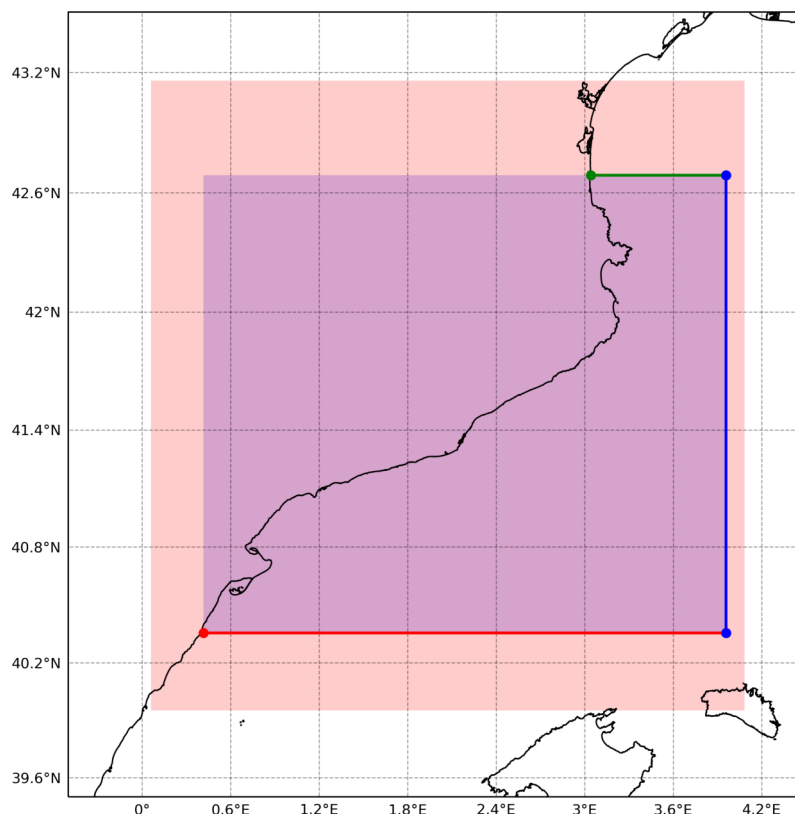
En el caso de la costa Catalana, se ha establecido una malla regular desde 40.36°N 0.42°E hasta 42.68°N 3.96°E, con un espaciado alrededor de 1 km por 1 km (Figura 4.15). Esto forma un recinto rectangular cerrado englobando la costa a estudiar en toda su longitud, que abarca desde la localidad de Peñíscola (Castellón) hasta Perpiñán (Francia). En el archivo de entrada a SWAN se ha introducido la línea siguiente, correspondiente al tipo de malla, coordenadas de origen, ángulo, longitud de los contornos y número de celdas. Los últimos dígitos de la línea corresponden a la resolución angular y a las frecuencias mínima y máxima del espectro.

```
CGRID REG 0.41666722 40.354168 0. 3.5416667 2.333332 300 259  
CIRcle 36 0.01 1
```

Para la batimetría se han utilizado los datos provenientes de la *European Marine Observation and Data Network (EMODnet)*, que a través de su *Bathymetry Portal*<sup>1</sup> ofrece la descarga de su modelo digital del terreno. Este órgano, promovido desde la Comisión Europea, intenta luchar contra la fragmentación que a lo largo de los años se ha desarrollado en cuanto a productos relacionados

---

<sup>1</sup><http://www.emodnet-bathymetry.eu>



**Figura 4.15:** Representación de las mallas utilizadas en el modelado. Se diferencian la malla de la batimetría (rosa), la malla computacional (azul) y los contornos de las condiciones iniciales en los bordes Norte, Este y Sur (azul, verde y rojo).

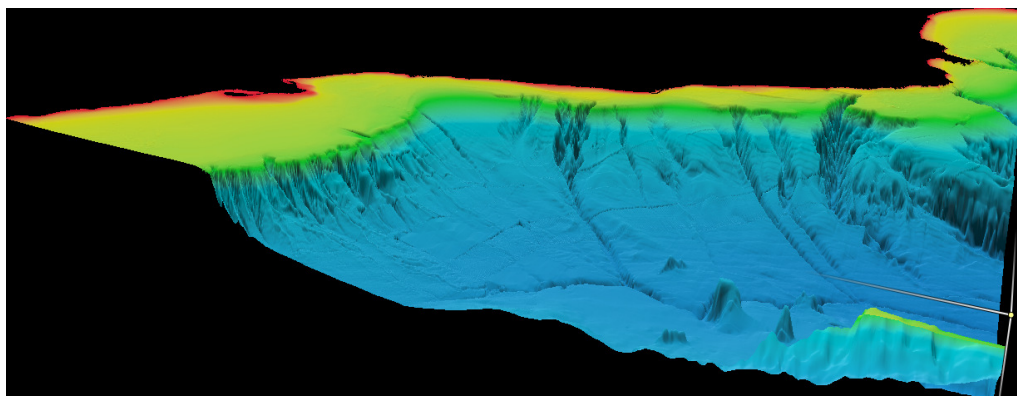
con el ámbito marítimo. El modelado está compuesto a partir de contribuciones de múltiples entidades de todos los países europeos a alta resolución, generando una malla con una resolución de 1/8 minuto de arco, equivalente a 230 metros. También se incluyen aportaciones de embarcaciones de recreo, que de forma desinteresada, comparten sus trazas de datos capturadas mediante las sondas, o batimetría derivada de datos de satélite.

Los datos de *EMODnet* son los de mayor resolución disponible a día de hoy y están actualizados con las campañas recientes del Instituto Español de Oceanografía (IEO) y el Instituto Hidrográfico de la Marina a muy alta resolución (1 metro de espaciado horizontal) en la zona de interés (Figura 4.16). En SWAN se ha utilizado la malla genérica introduciéndola como una malla regular, con las coordenadas y divisiones de manera similar a la malla computacional. Es necesario añadir dos comandos al archivo \*.swn, el primero para definir la malla y el segundo para indicar el archivo con los datos:

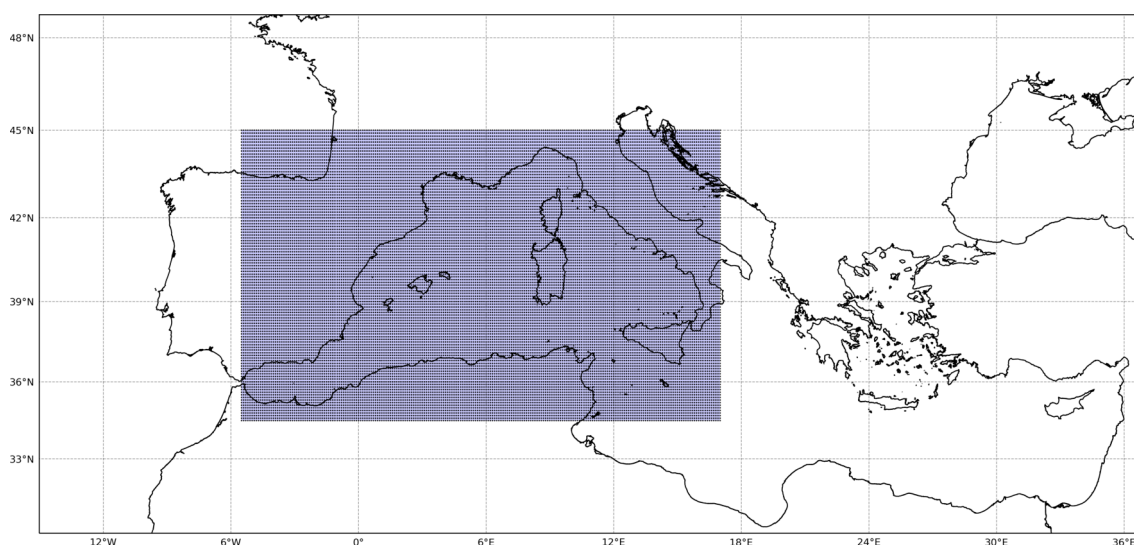
```
INPGRID BOTTOM REG 0.061279296875 39.950927197933176_
0.00 1930 1539 0.002083333333 0.002083333333
READINP BOTTOM 1. './Batimetria/EMODNET_Catalunya.dat' 1 0 FREE
```

Los campos de viento provenientes del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) se han introducido mediante una malla regular a una resolución de 1/10° (aproximadamente 10 km), correspondiente a la versión operacional (Figura 4.17).





**Figura 4.16:** Vista en perspectiva de la batimetría utilizada (EMODnet)



**Figura 4.17:** Dominio de los vientos introducidos en el modelo.

Estos valores se encuentran introducidos en diferentes archivos con extensión \*.dat, donde cada línea contiene los correspondientes vectores horizontal y vertical ( $u$ ,  $v$ ) de las componentes de viento para cada punto de la malla:

```
1.6860000e+03  1.7000000e+03  1.4030000e+03  8.5800000e+02
3.4100000e+02  -2.2700000e+02  -9.1800000e+02  -1.3810000e
+03  -1.6710000e+03  -1.8260000e+03  -1.8730000e+03
-1.9310000e+03  -2.3320000e+03  -3.2660000e+03  -1.9980000e
+03  5.4000000e+02  1.0690000e+03  3.3800000e+02
-4.7400000e+02  -8.5800000e+02
```

En el archivo de SWAN se ha detallado un archivo de texto \*.txt que contiene a su vez una lista de archivos \*.dat con los datos de viento de la manera anteriormente mostrada. Por eso, es necesario definir en el comando *INPGRID* las fechas de inicio y final de datos, que deben coincidir con los archivos definidos en *READINP*.

```
INPGRID WIND REGULAR -5.5 34.5 0. 225 105 0.1 0.1 NONSTATIONARY
```



```
20170801.000000 1 HR 20170901.000000
READINP WIND 0.001 SERIES './Vent/082017.txt' 3 0 0 0 FREE
```

A partir de la predicción generada por *CMEMS* mediante su producto *MEDSEA ANALYSIS FORECAST WAV 006 017* [G. Korres et al., 2017], se han obtenido las condiciones de contorno a aplicar en los bordes de la malla computacional. Esta predicción está basada en el modelo de oleaje *WAM Cycle 4.5.4* [Gunther H, 2012], y se ha desarrollado como resultado de un anidamiento entre dos mallas computacionales (fina y grosera) para asegurar que el oleaje se propague de manera correcta desde el Atlántico Norte hasta el Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar. La malla fina está calculada con una resolución de  $1/24^\circ$  (aproximadamente 4.6 kilómetros) y se ejecuta diariamente proporcionando una predicción a 5 días vista. Estos datos se distribuyen en formato netCDF a modo de un archivo diario, que contiene los datos de las 12h del día anterior hasta las 11h del día en curso. Como condiciones iniciales se toman la altura de ola significativa, período de pico, y la dirección de pico. Estos valores se deben formatear de manera específica para SWAN en unos archivos de texto con la extensión que se desee. La primera línea debe contener el comando TPAR, y a continuación detallarse para cada fecha, los valores de altura de ola, período de pico, dirección de pico y coeficiente de propagación direccional:

```
TPAR
20170630.120000 0.79600006 5.7300005 6.029999 22
20170630.130000 0.80700004 5.7300005 5.220001 22
20170630.140000 0.79800004 5.7300005 4.1200104 22
```

A partir de la malla de predicción, se han elegido los nodos más próximos a la malla computacional, creando un entorno semi-cerrado formado por tres segmentos Norte (78 km), Este (260 km) y Sur (300 km). A lo largo de estos segmentos, cabe recordar que sólo se dispone de datos en cada uno de los nodos y para cada nodo de la malla de predicción se ha establecido un radio de distancia donde se asume que el valor correcto es el del nodo del centro. De esta manera, se han definido diferentes segmentos para incorporar a SWAN donde las condiciones son constantes en toda su longitud. Estos segmentos están formados por puntos que se encuentran justo a la mitad de la distancia entre cada nodo de la malla de predicción. A continuación se muestra una parte de los comandos utilizados, de un total de 165, donde se han introducido los tres contornos. En este comando se detallan las coordenadas de los puntos inicial y final del segmento, y la ubicación del archivo que contiene dichos datos.

```
BOUND SEGM XY 3.083334 42.6875 3.104167342185974 42.6875 VAR
FILE 0. './Prediccion/N-3.083.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.104167342185974 42.6875 3.145833969116211
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccion/N-3.125.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.145833969116211 42.6875 3.1875005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccion/N-3.167.txt' 1
```

En cuanto al cálculo, se ha definido el esquema numérico de primer orden *Backward Space Backward Time (BSBT)* por ser un esquema implícito y suficientemente estable, junto a la precisión

numérica y los cambios relativos en altura de ola, período y el porcentaje de *wet points* que debe tener la malla. Este porcentaje corresponde al número de puntos que se incluyen en las computaciones, al considerar que representa un punto en el agua; por el contrario, hay puntos “secos” que no se incluyen en los cálculos ya que representan tierra firme.

PROP BSBT

NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 98 NONSTAT 15 0.1

En esta tesina se han ejecutado simulaciones consecutivas separadas por distintos meses dentro del intervalo estudiado (Julio a Diciembre del año 2017). Las computaciones de todos los meses exceptuando el primero se han iniciado a partir de una computación anterior, donde se utiliza el espectro obtenido en el día previo al primer día del mes en curso. De este modo, se anida el resultado de un cálculo previo para que el modelo de oleaje no comience desde cero. Este anidamiento se ha realizado insertando un archivo de espectro con extensión \*.bnd, correspondiente a una simulación del mes previo con SWAN. En el comando se debe definir el archivo y si se trata de un entorno cerrado o no.

BOUNDNEST1 NEST './Espectres/070p.bnd' CLOSED

No se ha desactivado ningún proceso físico adicional, con lo que SWAN computará con los parámetros por defecto con el modelo de tercera generación *GEN 3*, donde se tiene en cuenta el proceso de interacción ola-viento [Komen et al., 1984], Whitecapping [Komen et al., 1984], rotura por fondo [Battjes and Janssen, 1978] y la interacción onda-onda mediante *cuadruplets* [Hasselmann and Hasselmann, 1985].

#### 4.5.3. Datos de salida (*Output*)

Los resultados del cálculo se han exportado en dos diferentes tipos de archivo, con extensiones \*.dat y \*.mat. Los archivos \*.dat corresponden a un listado de las variables que se deseen en un único punto de la malla computacional. Este es útil para el análisis estadístico posterior, donde se han comparado los resultados del modelo con las mediciones de boyas. Para ello, se han descrito todos los puntos de localizaciones de boyas dentro de la malla computacional, sumando un total de cinco boyas (Banyuls sur Mer, Begur, Barcelona Coast, Tarragona Coast y Tarragona). Es necesario añadir dos comandos a SWAN, para indicar las coordenadas del punto a extraer y seguidamente detallar el nombre de archivo, las variables y las fechas deseadas:

POINTS 'Begur' 3.6449299387818432 41.91434534117294

TABLE 'Begur' HEADER './Boies/080p-Begur.dat' TIME BOTLEV HSIG  
PER RTP DIR PDIR OUT 20170801.000000 1. HR

Por otra parte, en los archivos \*.mat se ha exportado los resultados en toda la malla computacional. Este es un archivo más voluminoso ya que contiene, para cada nodo de la malla y cada intervalo de tiempo, los valores de todas las variables que se ha detallado en el comando. Es necesario nombrar el tipo de archivo, la estructura, las variables a exportar y el intervalo temporal:

BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '/scratch/javier.rodriguez.gallego/080p.  
mat' LAY 3 XP YP BOTLEV HSIG PER RTP \_

```
DIR PDIR 1 OUT 20170801.000000 1. HR
```

Con el ánimo de realizar un anidamiento en el mes siguiente, también se ha exportado el espectro de oleaje a un archivo \*.bnd mediante los comandos *NGRID* y *NESTOUT*. Se ha definido la misma malla que la utilizada en el cálculo, y se ha detallado la ruta del archivo de salida.

```
NGRID 'ago' 0.41666722 40.354168 0. 3.5416667 2.333332 300 259  
NESTOUT 'ago' '/scratch/javier.rodriguez.gallego/080p.bnd'
```

#### **4.5.4. Cálculo (*Lock-up*)**

Por último, se detalla el intervalo temporal a calcular y el paso temporal. En este estudio, se han realizado cálculos de cada mes completo, con un intervalo de una hora. El último comando indica el fin del proceso.

```
COMPUTE NONStationary 20170801.000000 1 HR 20170901.000000  
STOP
```

## 4.6. Computación

Para iniciar la ejecución del modelo, y una vez completado el archivo \*.swn con todas las instrucciones y datos de entrada, sólo es necesario ejecutar el programa definiendo el archivo a calcular. Como este paso se realiza en el ordenador *TITANI*, se ha programado un *script* en el que se detalla la cantidad de recursos a utilizar por el ordenador. Para realizar los cálculos mensuales, se ha establecido el uso de 3 nodos, con 8 GB de memoria RAM por nodo, y 6 procesadores por nodo. Con estas especificaciones se consigue calcular un archivo (un mes completo) en aproximadamente 2h 30 minutos de computación.

Al finalizar el proceso, SWAN genera diferentes archivos:

1. *norm\_end*: archivo de texto indicando si el proceso ha acabado correctamente.
2. PRINT: archivo de texto indicando todos los pasos que se han ejecutado en el proceso, durante la ejecución se crean 24 archivos similares. Se detallan todas las iteraciones, los datos de entrada y la lectura de archivos.

Por otra parte, el gestor de colas *SLURM* del ordenador también crea un archivo de texto (extensión \*.out) donde se detalla cuál es el resultado de la ejecución del *script*.

Tras comprobar que todas las simulaciones se ejecutan correctamente, y para agilizar el proceso operativo de simulación de los meses, se ha programado el siguiente código, que:

1. Prepara los recursos de *TITANI* reservando los nodos, los procesadores y la memoria necesaria.
2. Copia el archivo de SWAN con extensión \*.swn junto al ejecutable swan.exe y swanrun
3. Ejecuta SWAN utilizando órdenes *MPI*
4. Copia el archivo de espectro desde la carpeta *scratch* hasta la carpeta *Espectres* dentro del directorio del usuario.
5. Borra todos los archivos creados en la computación, incluido el espectro, el archivo \*.swn y los archivos creados por SWAN y por *SLURM*.

Los archivos con los resultados en los puntos de las boyas (\*.dat) se han guardado directamente en la carpeta *Boies* del directorio del usuario, y la malla completa (\*.mat) se guarda en la carpeta *scratch* debido a su tamaño, por lo que no ha sido necesario incluirlas en el *script*.

```
#!/bin/bash
#SBATCH --partition=express
#SBATCH --nodes=3
#SBATCH --mem=8000
#SBATCH --ntasks-per-node=6
fitxer=$1.swn
cp /users/$USER/Swn/$fitxer /users/$USER
```

```
mpirun /users/$USER/swanrun -input /users/$USER/$fitxer
cp /scratch/$USER/*.bnd /users/$USER/Espectres
rm /scratch/$USER/*.bnd
rm /users/$USER/INPUT
rm /users/$USER/PRINT*
rm /users/$USER/*.out
rm /users/$USER/norm_end
rm /users/$USER/$fitxer
```

Con el *script* anterior, para iniciar el cálculo en SWAN sólo se requiere añadir el proceso a la cola mediante la secuencia *sbatch [script] [nombre archivo swn]*. Si el archivo a ejecutar tiene por nombre “agost-Op”, para iniciar la simulación basta con llamar:

```
sbatch ones agost-Op
```

## 4.7. Postproceso

Tanto el análisis estadístico en los puntos de las boyas, como la representación visual de los resultados de SWAN se logran con herramientas de terceros, ya que el programa por sí mismo sólo genera archivos de texto. A continuación se muestra un ejemplo de la cabecera y primeras líneas de un archivo \*.dat con los datos de una posición en concreto de la malla:

```
%
% Run:Cat      Table:Tarragona          SWAN version:41.20
%
%   Time          Hsig      Period  RTpeak    Dir      PkDir
%   [ ]          [m]       [sec]    [sec]    [degr]   [degr]
%
20171001.0000  0.23951  2.6580  2.8730  180.514  205.000
20171001.0100  0.24716  2.5572  2.8730  163.750  205.000
20171001.0200  0.25831  2.5891  2.8730  138.102   75.000
20171001.0300  0.27302  2.7026  2.8730  113.511   65.000
20171001.0400  0.29263  2.8600  3.8312   96.001   65.000
```

Para poder procesar estos datos, se han programado diferentes rutinas en *Python* con las que poder extraer cada una de las variables y poder trabajar con ellas. Los resultados en las boyas se exportan en un archivo de texto con los valores tabulados separados por espacios, por lo que se ha tenido que obtener cada una de las variables iterando según el espaciado. En cambio, como el resultado de la malla se exporta en un archivo \*.mat del formato propiedad de *Matlab*, la información está estructurada y es posible acceder a las variables por separado de manera directa.

Se ha intentado que los resultados de la malla SWAN se exportaran a un formato libre como *netCDF* con el ánimo de desarrollar todo el estudio utilizando herramientas gratuitas y de código abierto, pero no ha sido posible debido a la mera estructura del ordenador *TITANI*; para compilar *netCDF* es necesario acceder a una carpeta donde los usuarios de dicho ordenador no tenemos permisos de escritura. En cambio, en un equipo donde el usuario sea el administrador, resulta trivial adaptar este formato de archivo a SWAN.

# Resultados

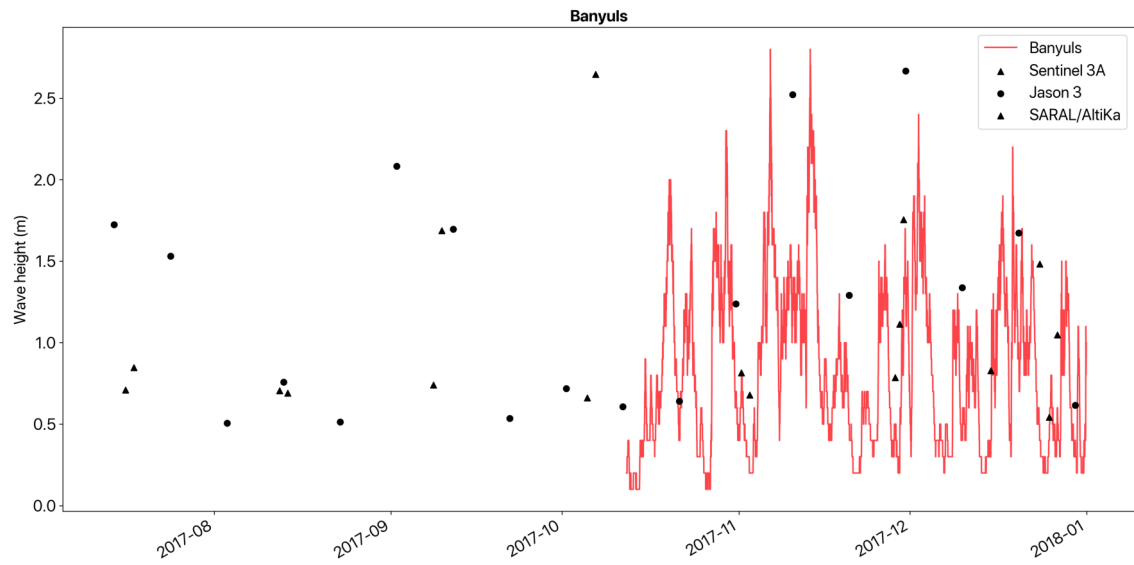
## 5.1. Validación de las observaciones de satélite a partir de las medidas de boyas in situ

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la comparación entre las observaciones de altura de ola obtenidas mediante los satélites Jason 3, Sentinel 3A y la misión complementaria SARAL/AltiKa, para el periodo comprendido entre Julio y Diciembre de 2017.

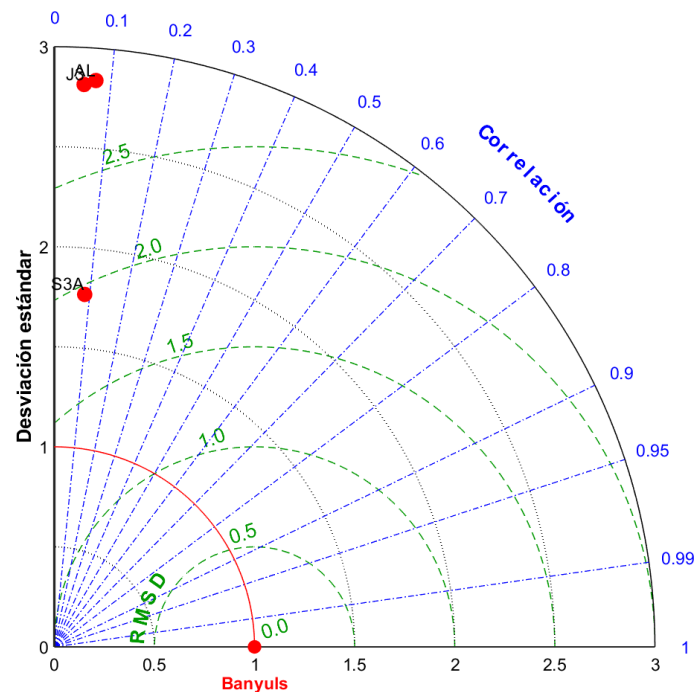
Las siguientes figuras corresponden a las boyas de Banyuls, Barcelona costera, Begur y Tarragona, que son las más próximas a la costa catalana y además forman una combinación de boya costera y boya profunda de interés para el análisis.

Ítem	Desv. estándar	RMSE	Correlación (r)
Banyuls	1.00	0.00	1.00
Sentinel 3A	1.77	1.86	0.09
Jason 3	2.82	2.9	0.05
SARAL/AltiKa	2.84	2.87	0.07

**Tabla 5.1:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.1)



**Figura 5.1:** Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa

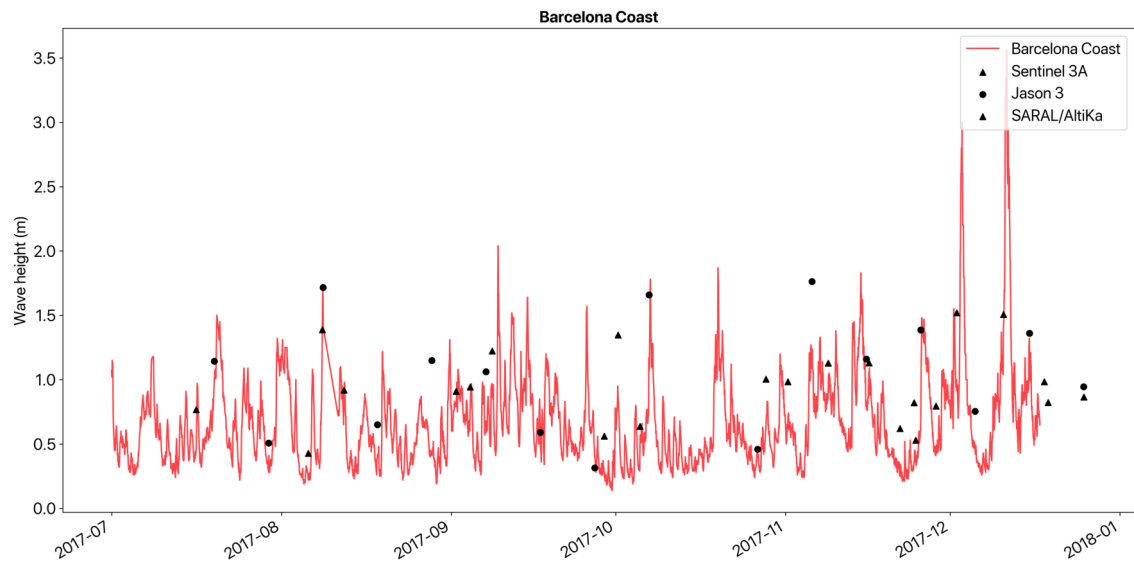


**Figura 5.2:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa

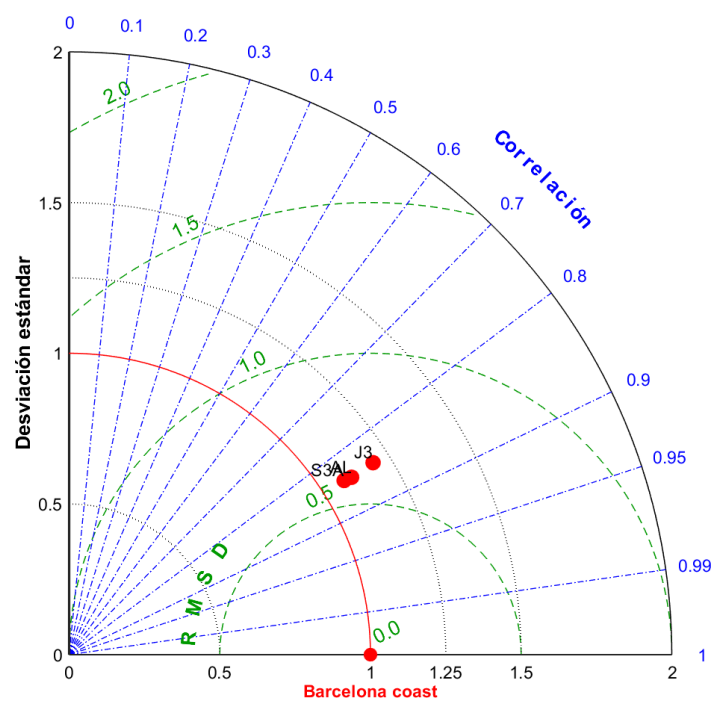


Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Barcelona Coast	1.00	0.00	1.00
Sentinel 3A	1.08	0.55	0.84
Jason 3	1.19	0.57	0.85
SARAL/AltiKa	1.11	0.55	0.85

**Tabla 5.2:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.3)



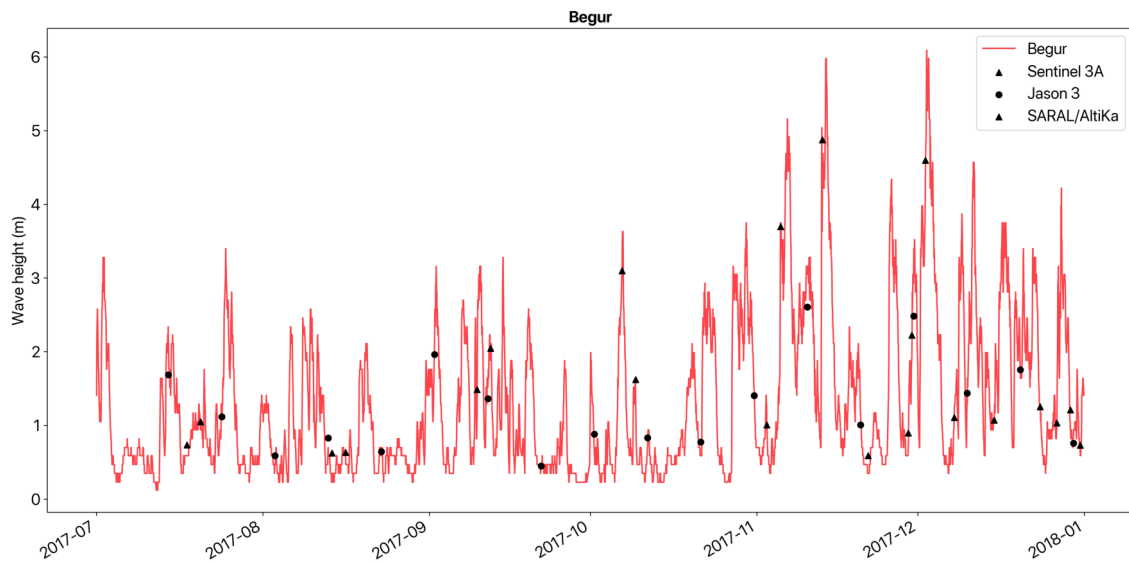
**Figura 5.3:** Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



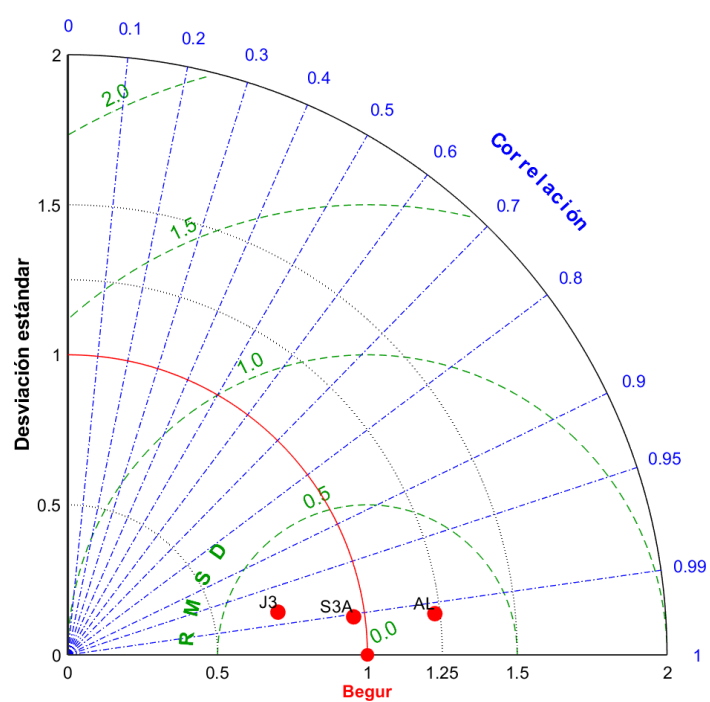
**Figura 5.4:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Begur	1.00	0.00	1.00
Sentinel 3A	0.96	0.18	0.99
Jason 3	0.72	0.35	0.98
SARAL/AltiKa	1.23	0.29	0.99

**Tabla 5.3:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.5)



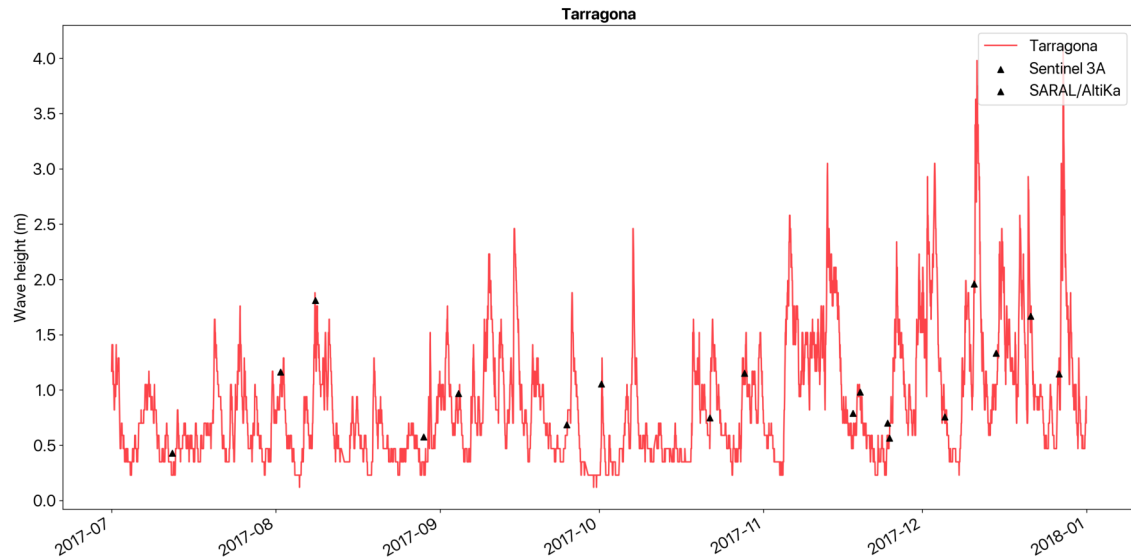
**Figura 5.5:** Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



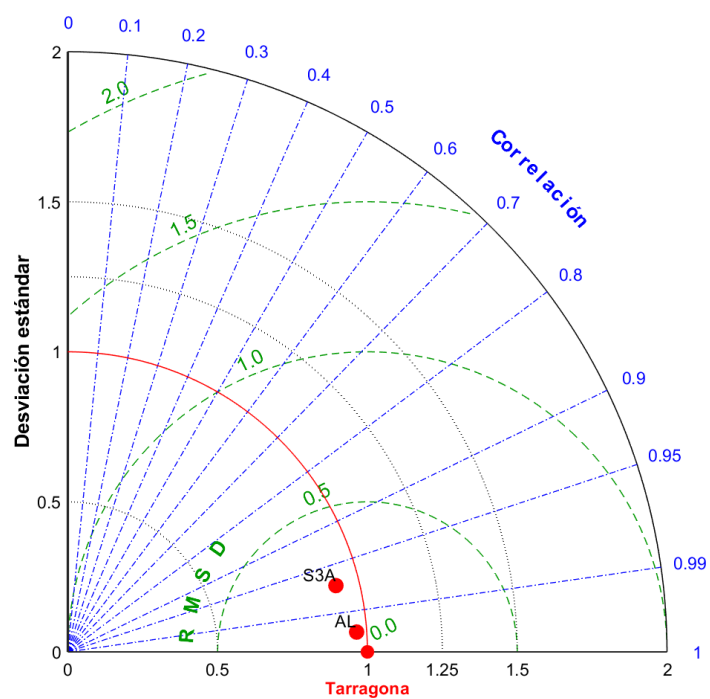
**Figura 5.6:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Tarragona	1	0.00	1.00
Sentinel 3A	0.92	0.25	0.97
SARAL/AltiKa	0.97	0.07	1.00

**Tabla 5.4:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.7)



**Figura 5.7:** Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa



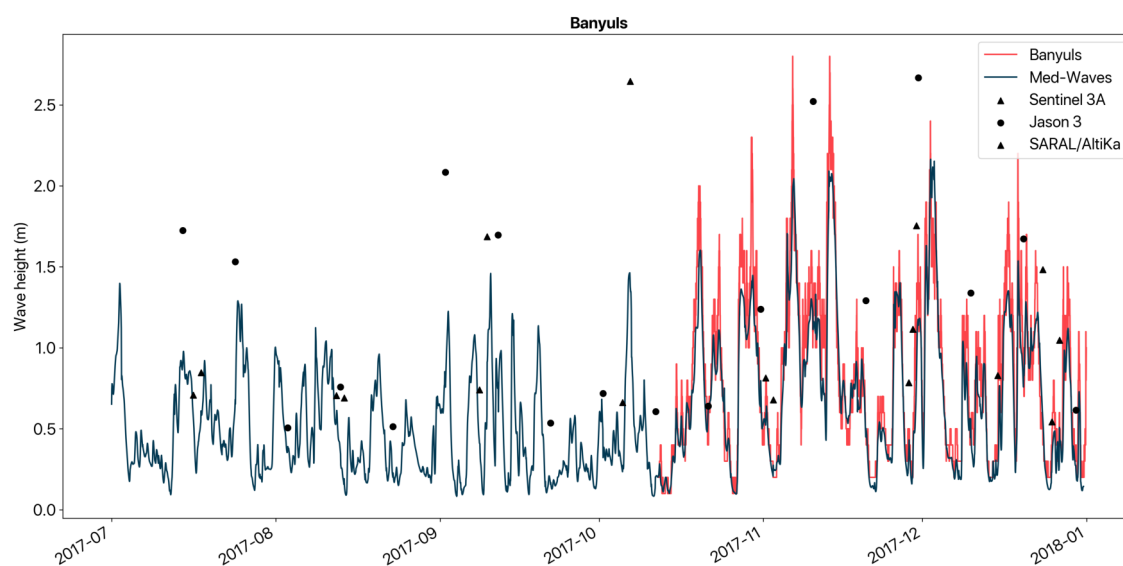
**Figura 5.8:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa

## 5.2. Validación de las predicciones del modelo Med-Waves a partir de las medidas in situ y satélite

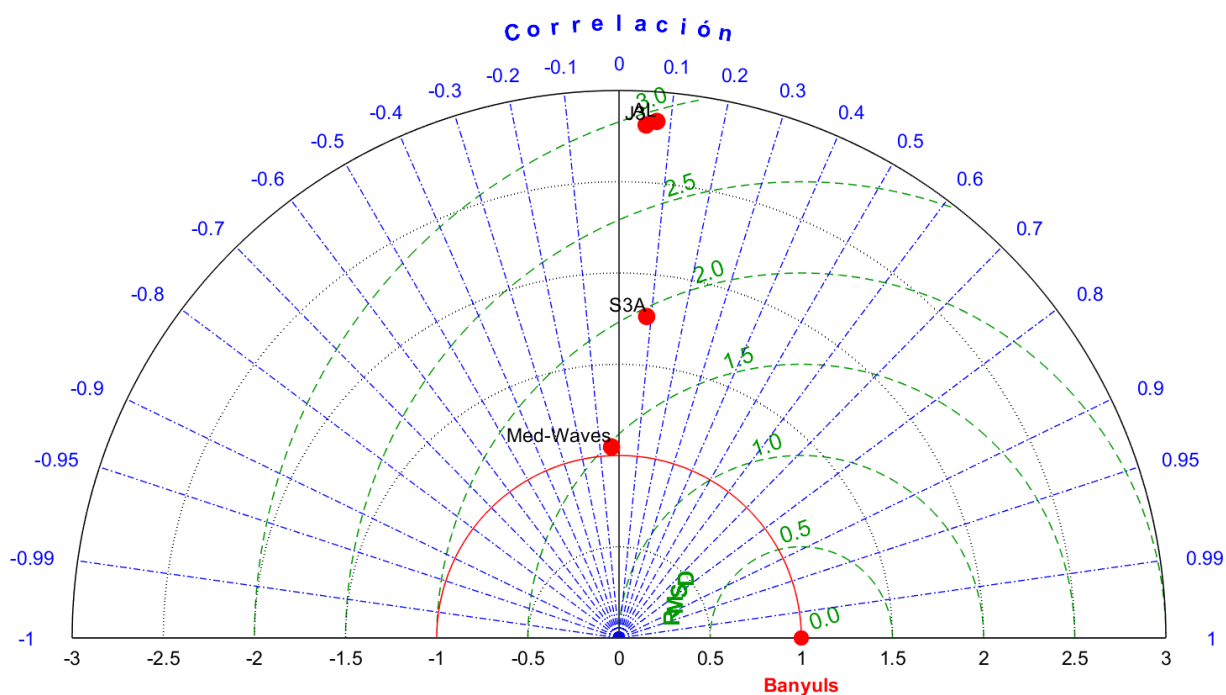
### 5.2.1. Boyas

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Banyuls	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	1.05	1.48	-0.04
Sentinel 3A	1.77	1.86	0.09
Jason 3	2.82	2.9	0.05
SARAL/AltiKa	2.84	2.87	0.07

**Tabla 5.5:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.9)



**Figura 5.9:** Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves

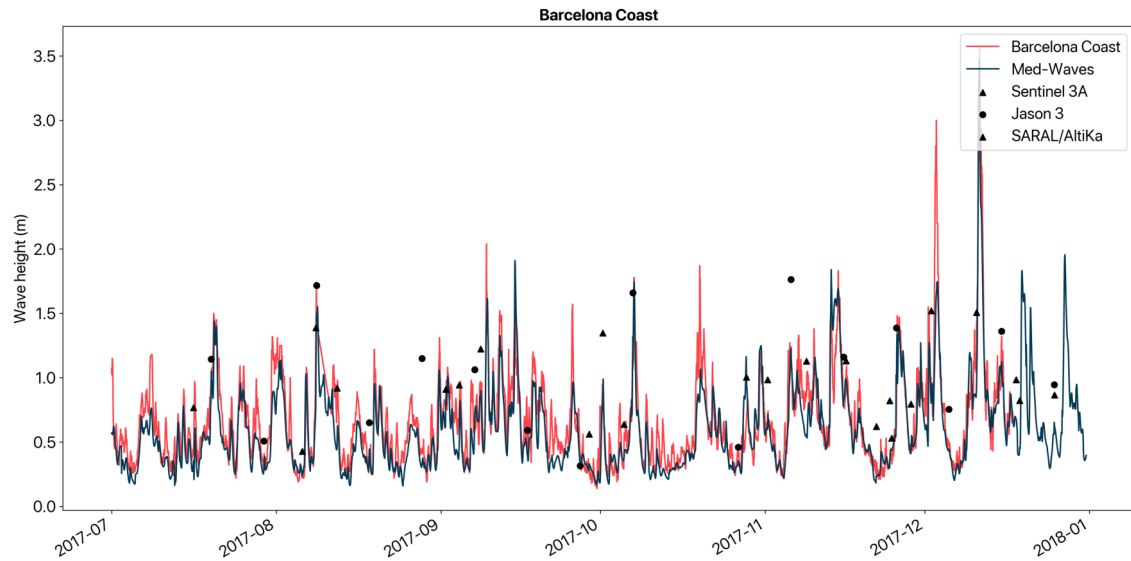


**Figura 5.10:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves

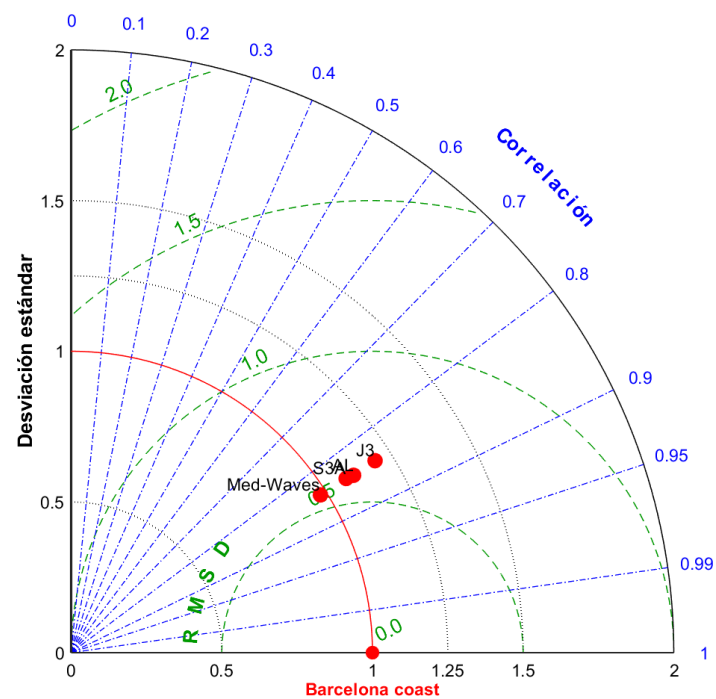


Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Barcelona coast	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	0.98	0.58	0.85
Sentinel 3A	1.08	0.55	0.84
Jason 3	1.19	0.57	0.85
SARAL/AltiKa	1.11	0.55	0.85

**Tabla 5.6:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.11)



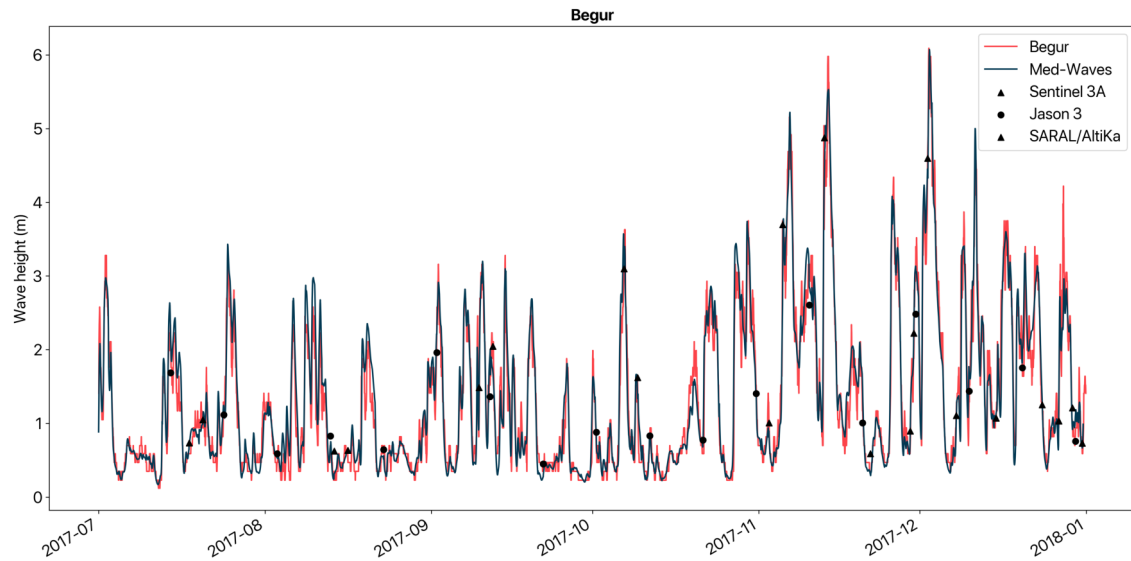
**Figura 5.11:** Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves



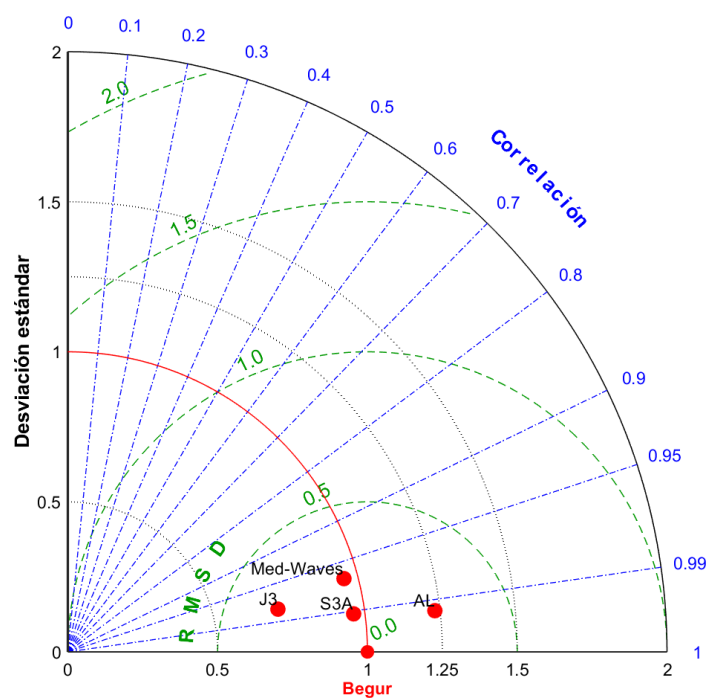
**Figura 5.12:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Begur	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	0.95	0.25	0.97
Sentinel 3A	0.96	0.18	0.99
Jason 3	0.72	0.35	0.98
SARAL/AltiKa	1.23	0.29	0.99

**Tabla 5.7:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.13)



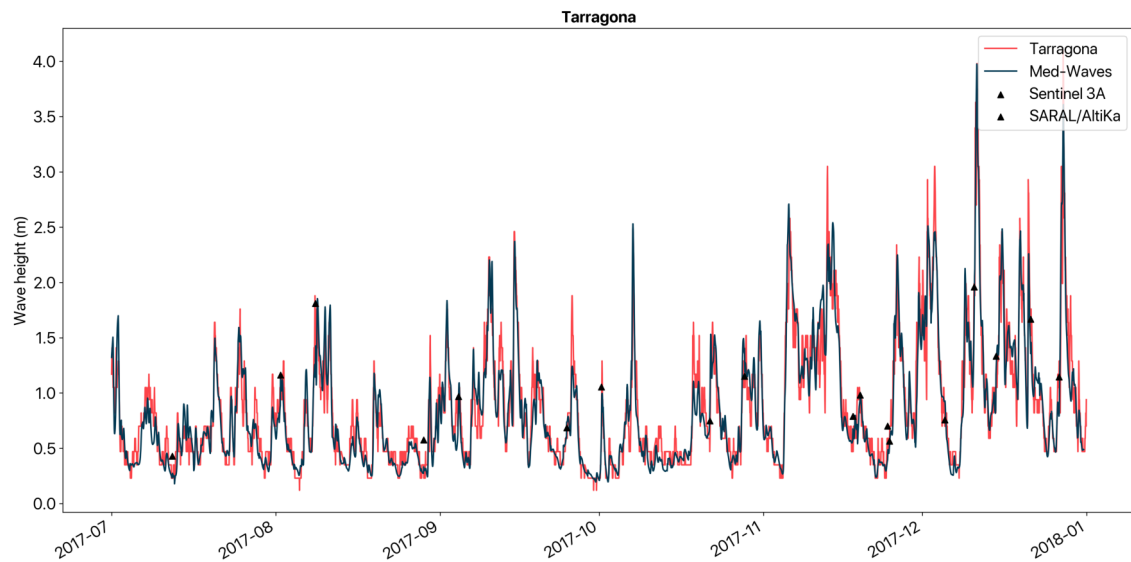
**Figura 5.13:** Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves



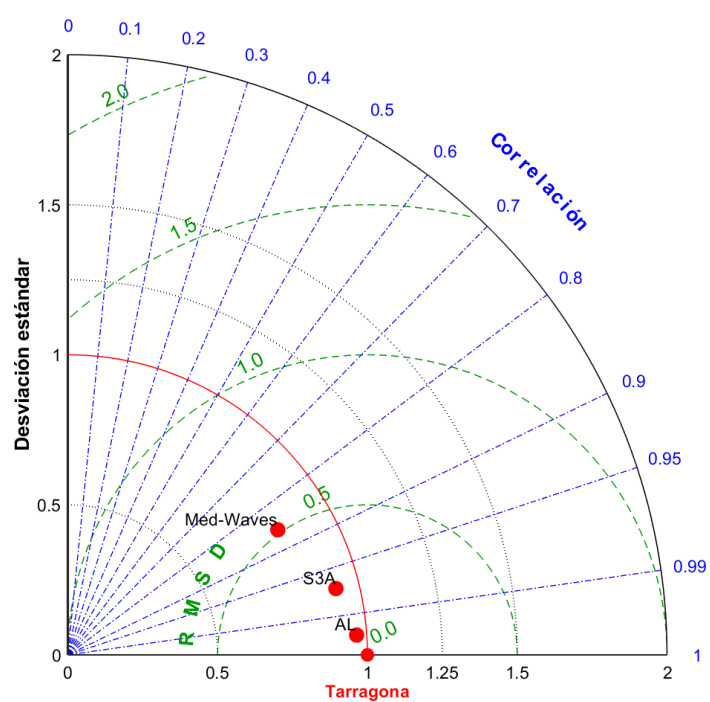
**Figura 5.14:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Tarragona	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	0.82	0.50	0.86
Sentinel 3A	0.92	0.25	0.97
SARAL/AltiKa	0.97	0.07	1.00

**Tabla 5.8:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.15)



**Figura 5.15:** Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves

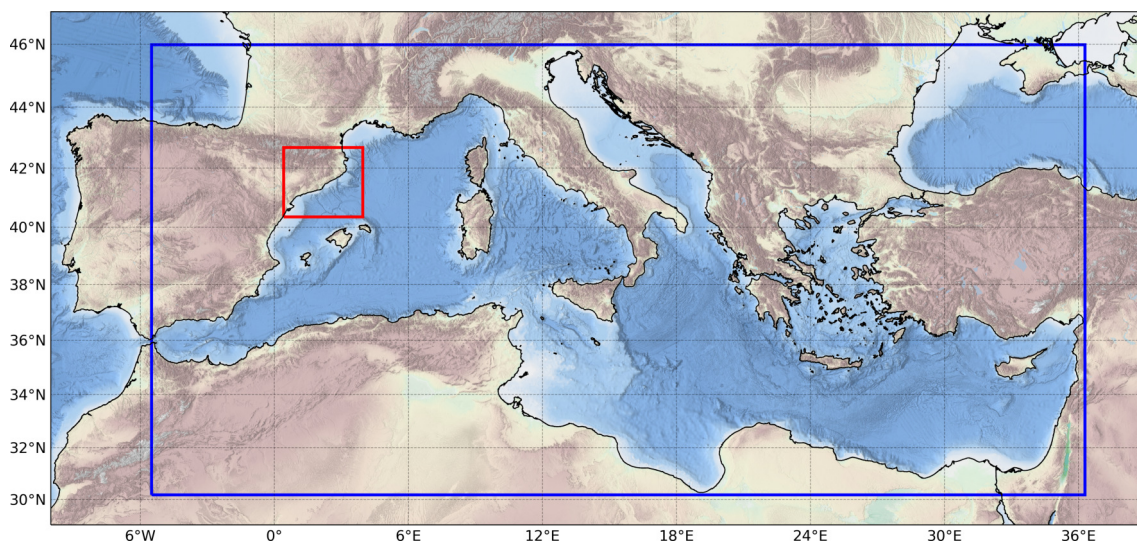


**Figura 5.16:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción Med-Waves

### 5.2.2. Comparación de la malla del modelo Med-Waves con las observaciones de satélite

Se han realizado diversos análisis, donde se ha evaluado el punto de la observación del satélite con el punto de la malla más cercano, obteniendo como media unas distancias menores al kilómetro.

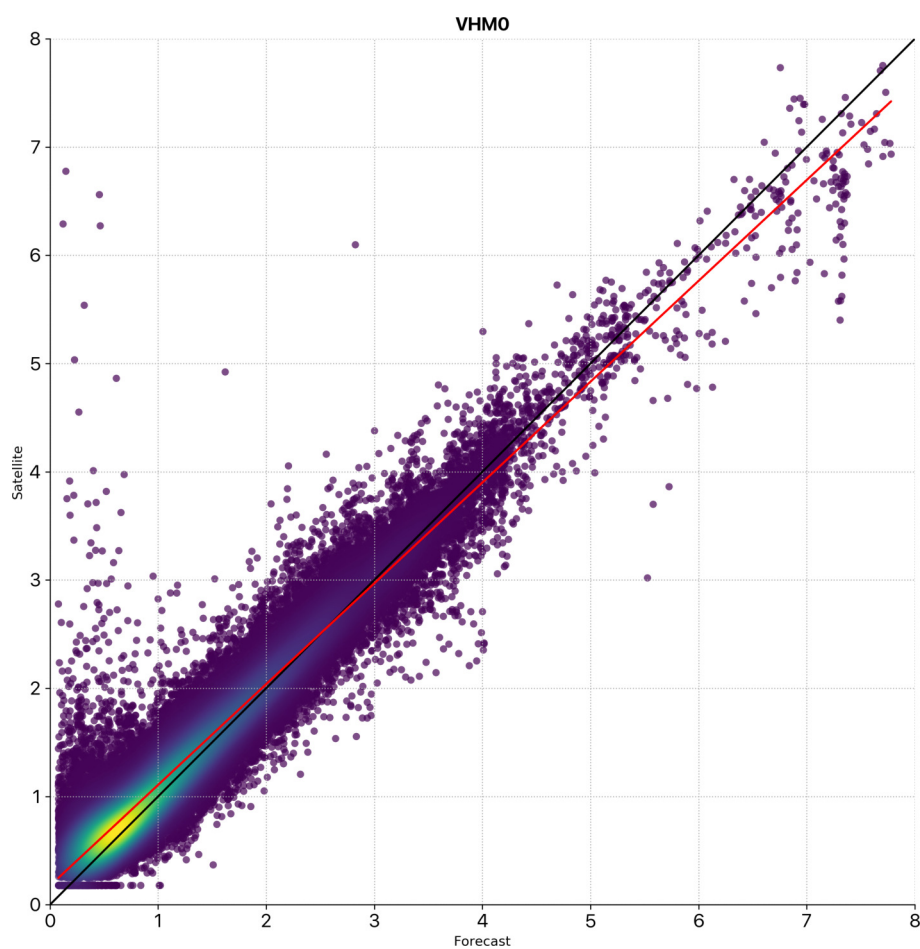
En primer término se ha analizado toda el área del mar Mediterráneo, para pasar seguidamente al análisis en detalle de la zona del mar Balear (Figura 5.17).



**Figura 5.17:** Mapa de las zonas del mar Mediterráneo analizadas. Se diferencia el dominio mayor del mar Mediterráneo (azul) y el dominio reducido del mar Balear (rojo)

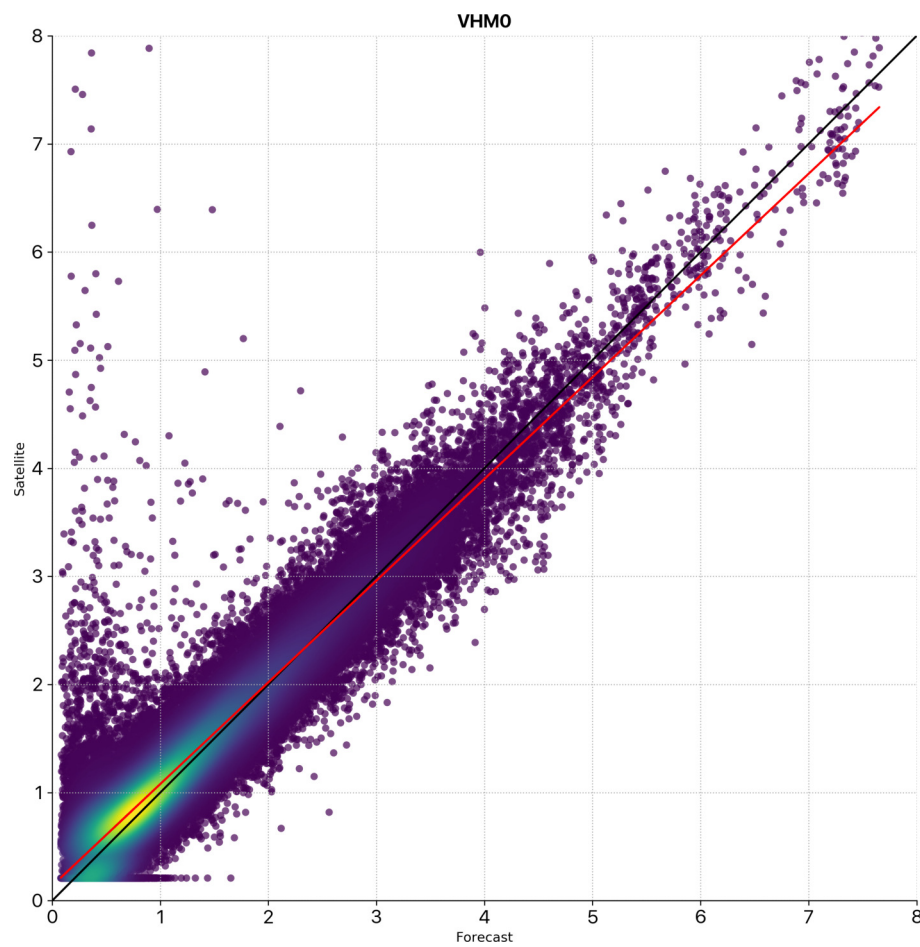
Satélite	RMSE	bias	SI	Correlación (r)
Sentinel 3A	0.27	-0.09	0.21	0.96
Jason 3	0.32	-0.06	0.26	0.94
SARAL/AltiKa	0.26	-0.06	0.19	0.96

**Tabla 5.9:** Estadísticos de las dispersiones 5.18, 5.19 y 5.20 de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa frente al modelo Med-Waves para el mar Mediterráneo

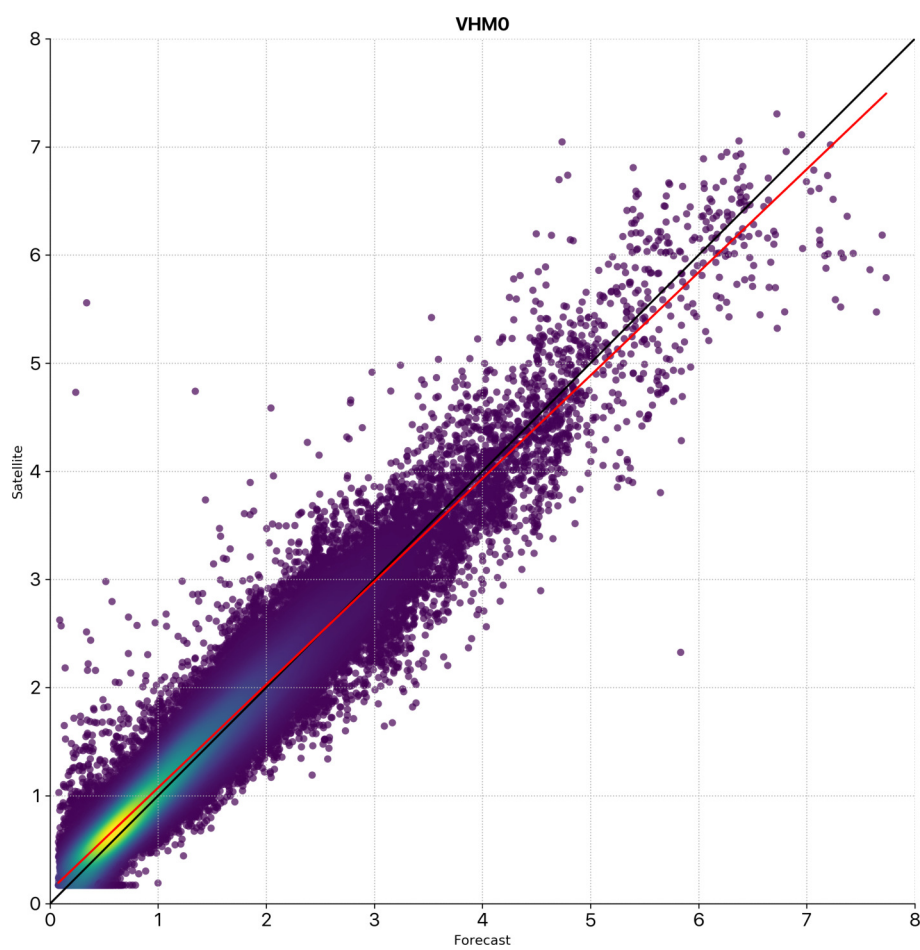


**Figura 5.18:** Diagrama de dispersión entre el satélite Sentinel 3A y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Mediterráneo, de Julio de 2017 a Mayo de 2018. 109943 puntos analizados





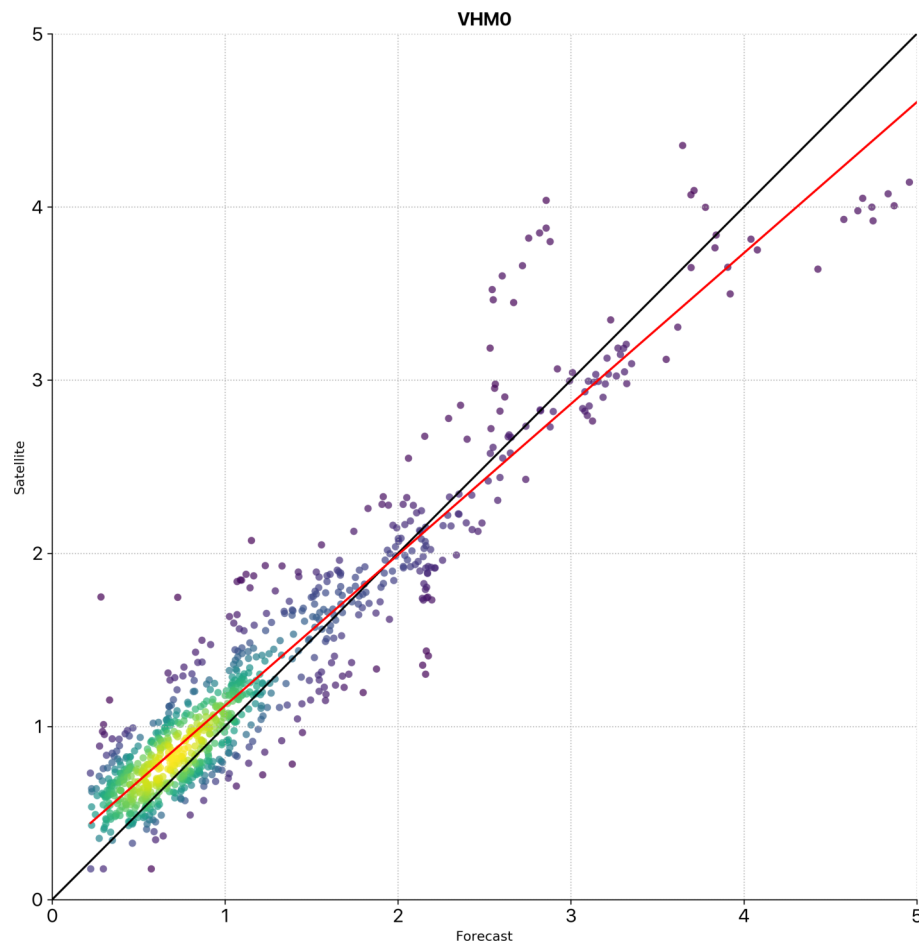
**Figura 5.19:** Diagrama de dispersión entre el satélite Jason 3 y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Mediterráneo, de Julio de 2017 a Mayo de 2018. 120709 puntos analizados



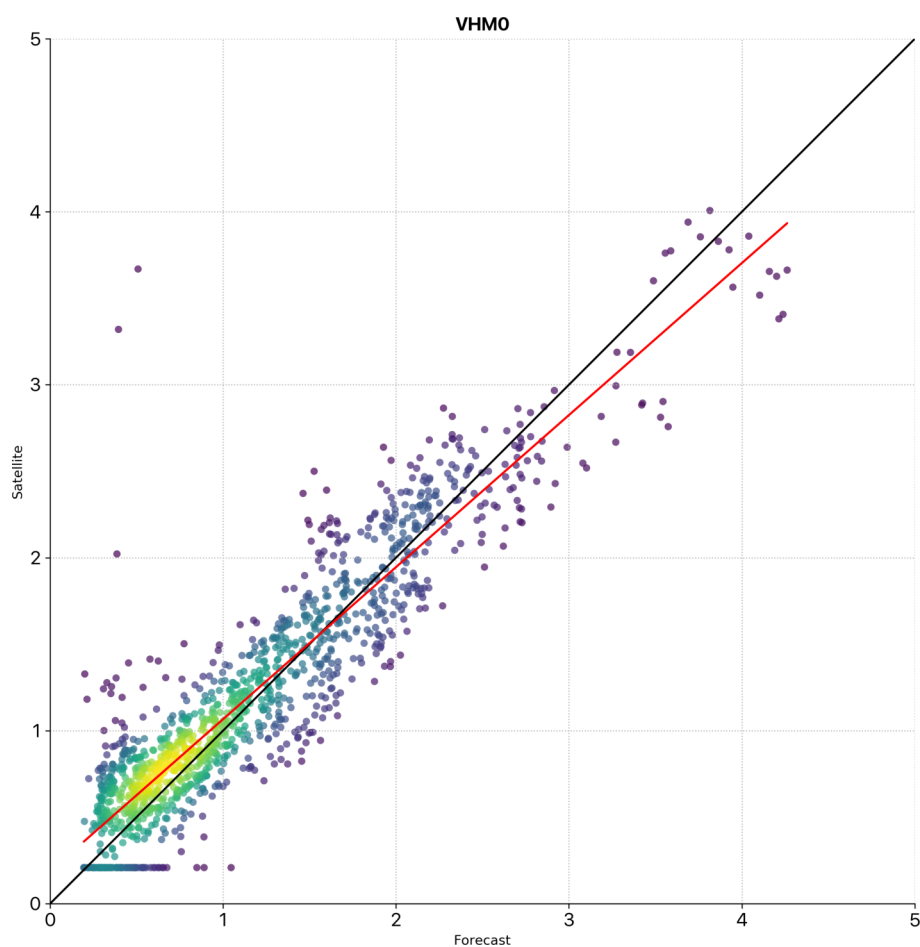
**Figura 5.20:** Diagrama de dispersión entre el satélite SARAL/AltiKA y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Mediterráneo, de Julio de 2017 a Mayo de 2018. 69707 puntos analizados

Satélite	RMSE	bias	SI	Correlación (r)
Sentinel 3A	0.29	-0.09	0.22	0.95
Jason 3	0.30	-0.04	0.25	0.92
SARAL/AltiKa	0.25	-0.12	0.20	0.94

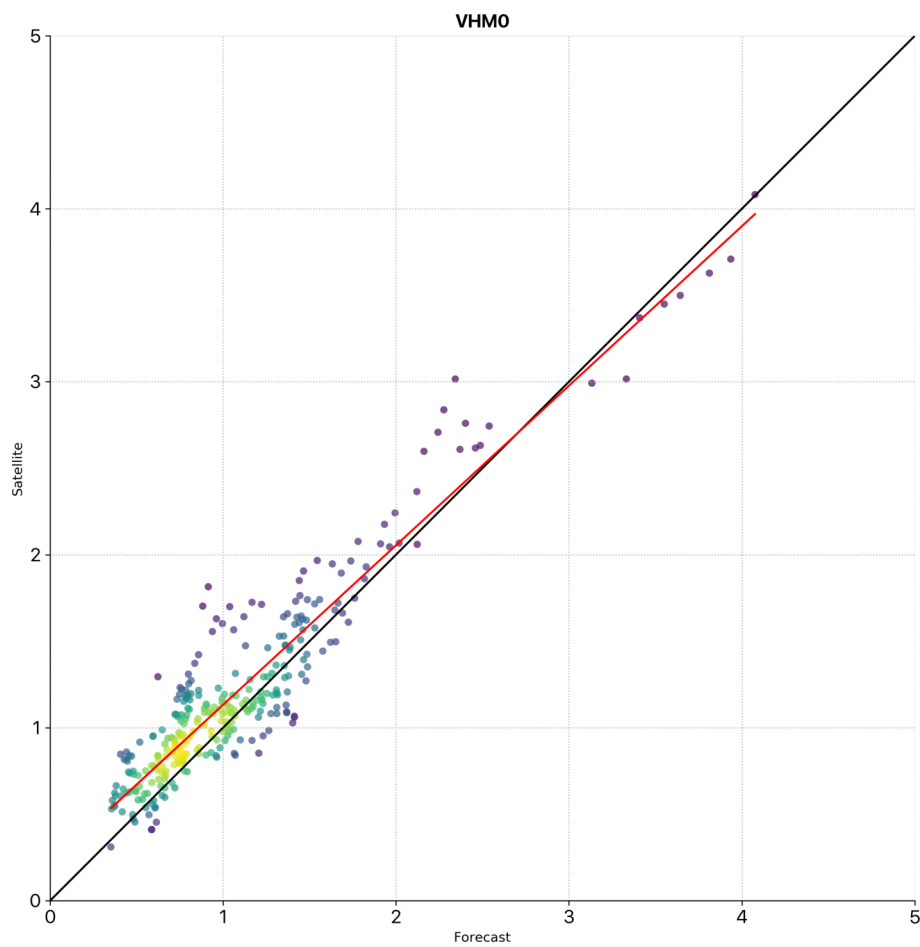
**Tabla 5.10:** Estadísticos de las dispersiones 5.21, 5.22 y 5.23 de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa frente al modelo Med-Waves para el mar Balear



**Figura 5.21:** Diagrama de dispersión entre el satélite Sentinel 3A y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 913 puntos analizados

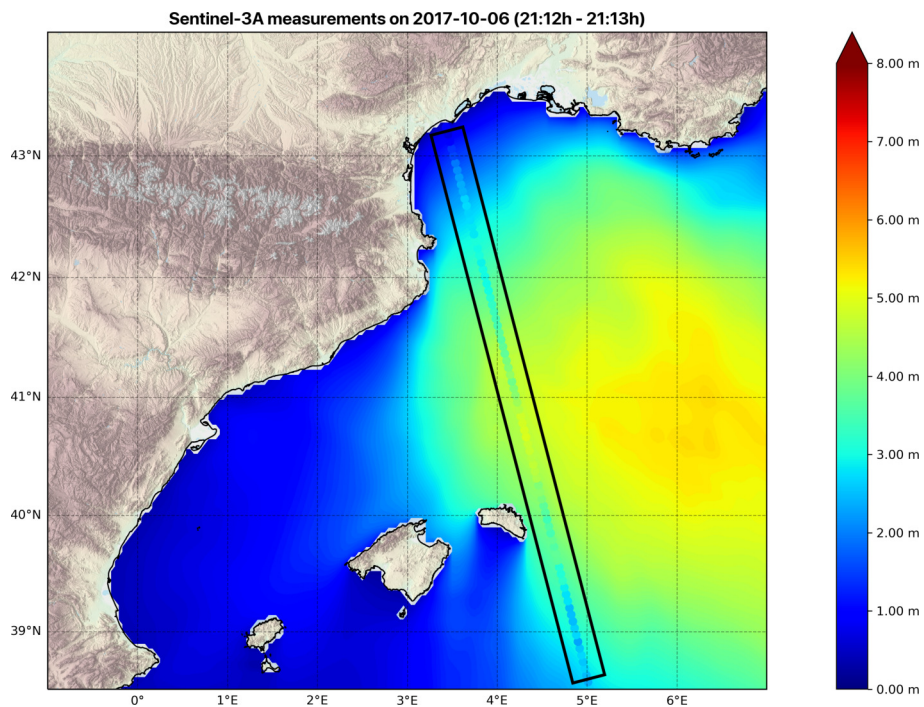


**Figura 5.22:** Diagrama de dispersión entre el satélite Jason 3 y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 1300 puntos analizados



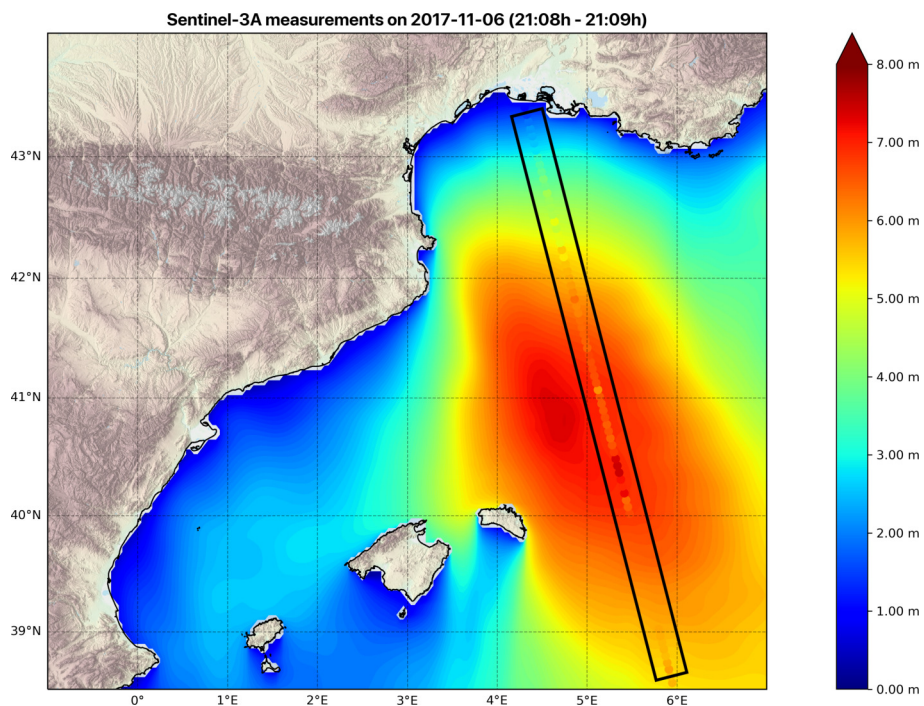
**Figura 5.23:** Diagrama de dispersión entre el satélite SARAL/AltiKA y el modelo Med-Waves para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 312 puntos analizados

Adicionalmente, se han representado algunos mapas comparativos donde se muestra la predicción del modelo Med-Waves para altura de ola y la traza dibujada por el satélite durante eventos de tormenta recientes, tanto por el satélite Jason 3 como Sentinel 3A.

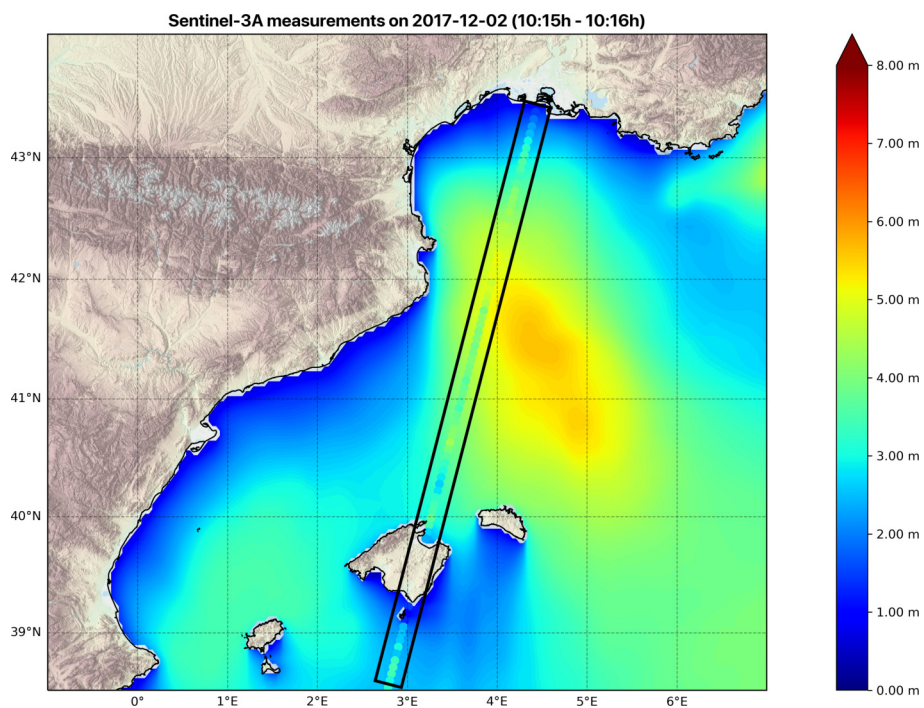


**Figura 5.24:** Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Sentinel 3A para el día 6 de Octubre de 2017 a las 21:12h

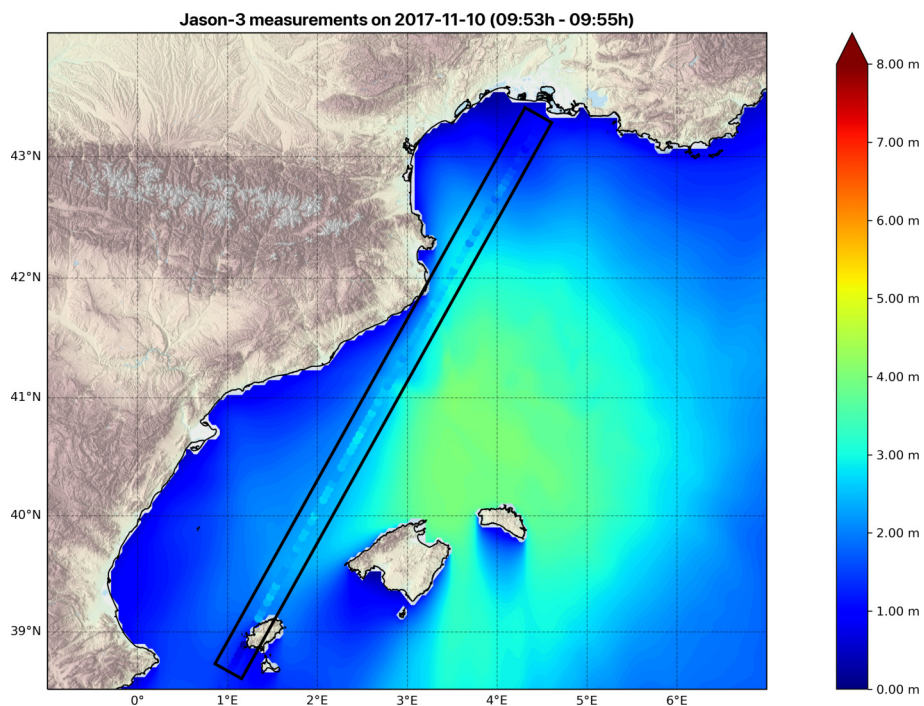




**Figura 5.25:** Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Sentinel 3A para el día 6 de Noviembre de 2017 a las 21:08h

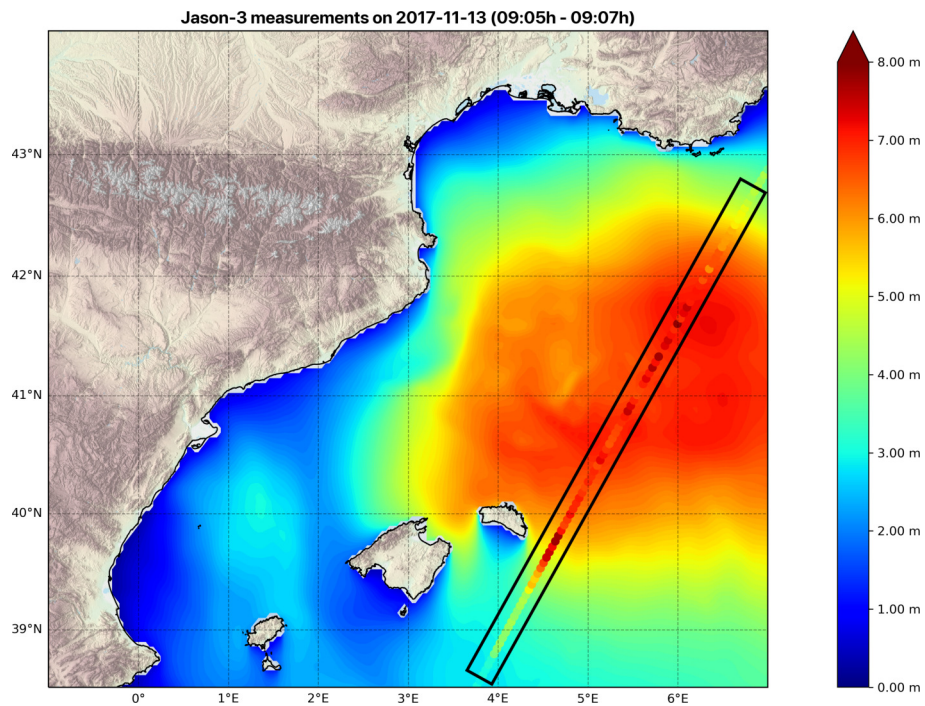


**Figura 5.26:** Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Sentinel 3A para el día 2 de Diciembre de 2017 a las 10:15h

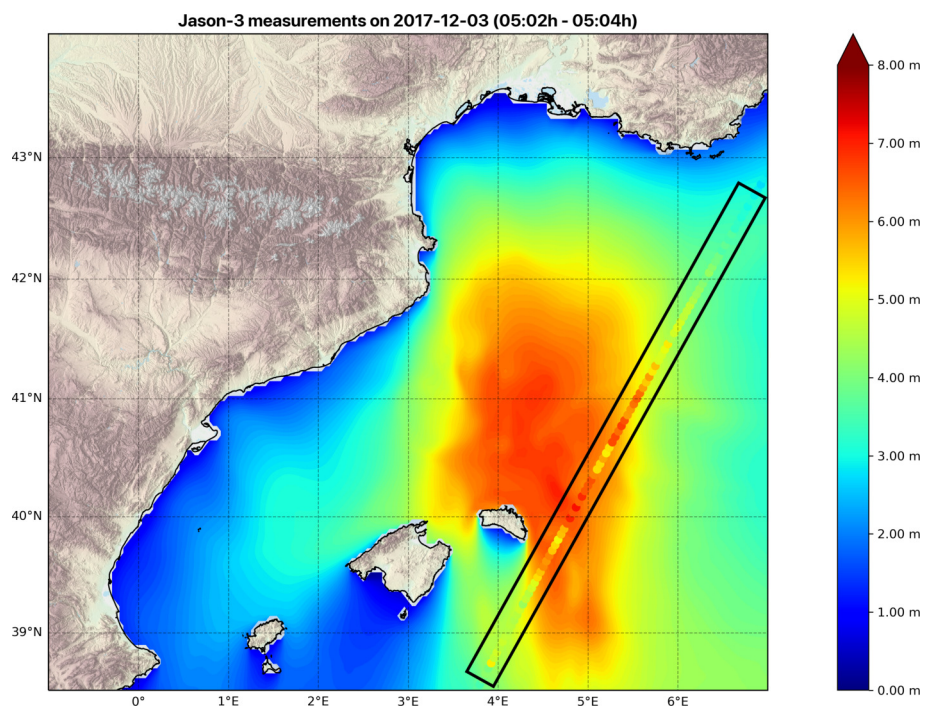


**Figura 5.27:** Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Jason 3 para el día 10 de Noviembre de 2017 a las 09:53h





**Figura 5.28:** Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Jason 3 para el día 13 de Noviembre de 2017 a las 09:05h



**Figura 5.29:** Distribución espacial de altura de ola del modelo Med-Waves con superposición de trazas del satélite Jason 3 para el día 3 de Diciembre de 2017 a las 05:02h

### 5.3. Validación del modelo de alta resolución implementado en SWAN a partir de las medidas in situ y satélite

#### 5.3.1. Boyas

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Banyuls	1.00	0.00	1.00
SWAN	1.19	1.61	-0.03
Sentinel 3A	1.77	1.86	0.09
Jason 3	2.82	2.9	0.05
SARAL/AltiKa	2.84	2.87	0.07

Tabla 5.11: Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.30)

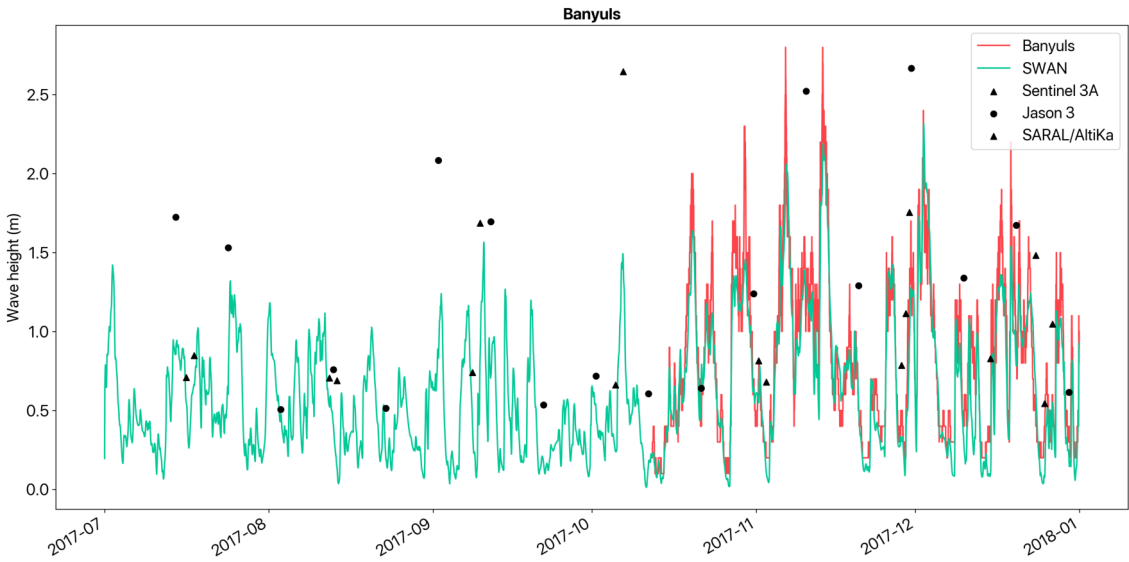
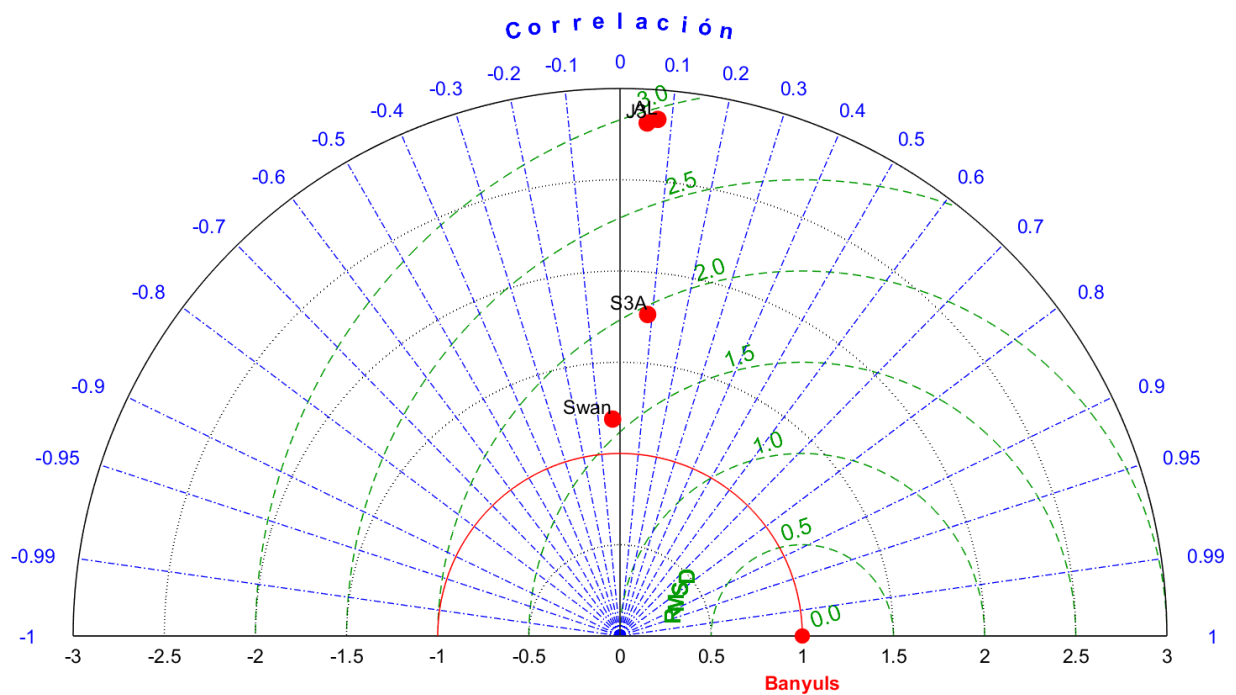


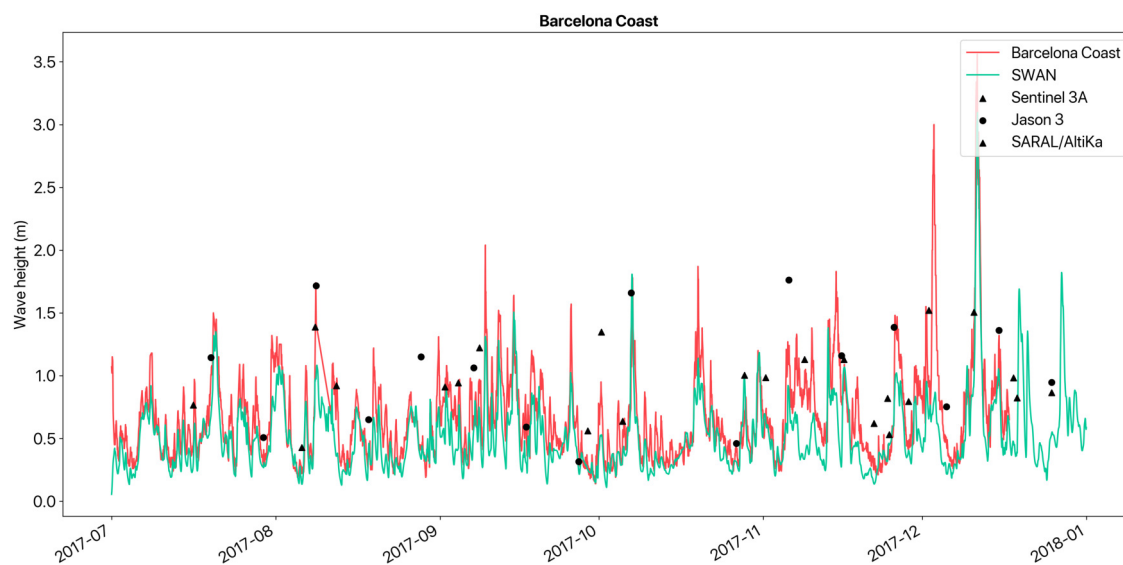
Figura 5.30: Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN



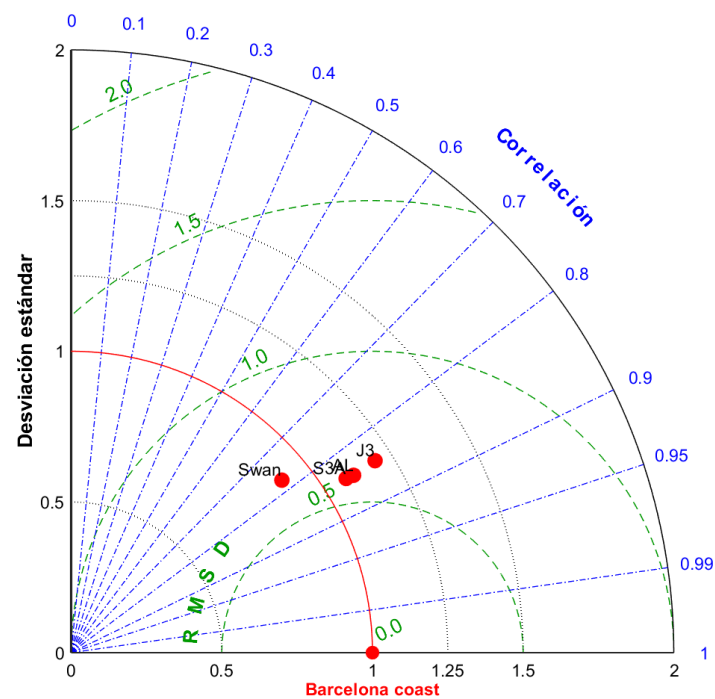
**Figura 5.31:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Barcelona coast	1.00	0.00	1.00
SWAN	0.90	0.62	0.77
Sentinel 3A	1.08	0.55	0.84
Jason 3	1.19	0.57	0.85
SARAL/AltiKa	1.11	0.55	0.85

**Tabla 5.12:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.32)



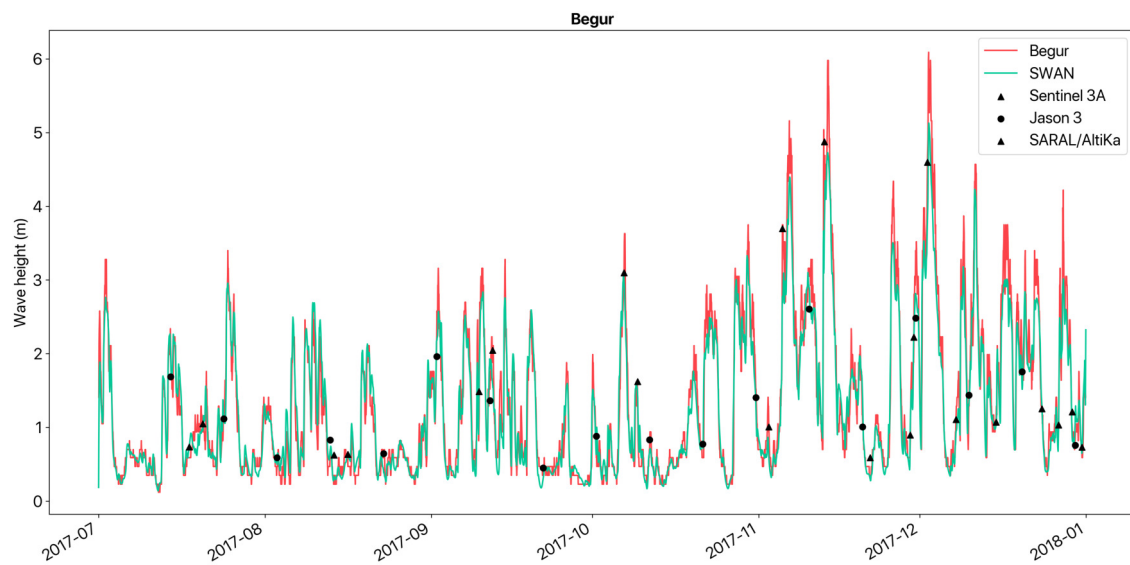
**Figura 5.32:** Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN



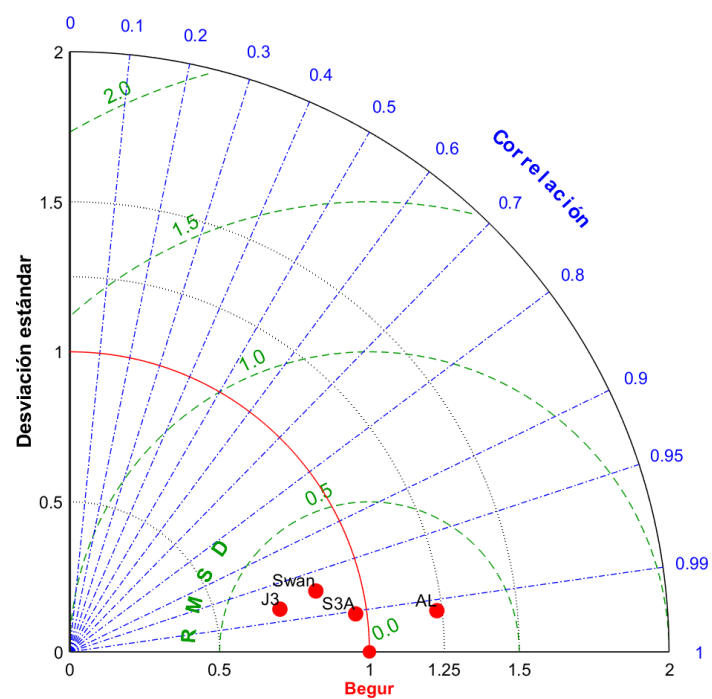
**Figura 5.33:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Begur	1.00	0.00	1.00
SWAN	0.85	0.28	0.97
Sentinel 3A	0.96	0.18	0.99
Jason 3	0.72	0.35	0.98
SARAL/AltiKa	1.23	0.29	0.99

**Tabla 5.13:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.34)



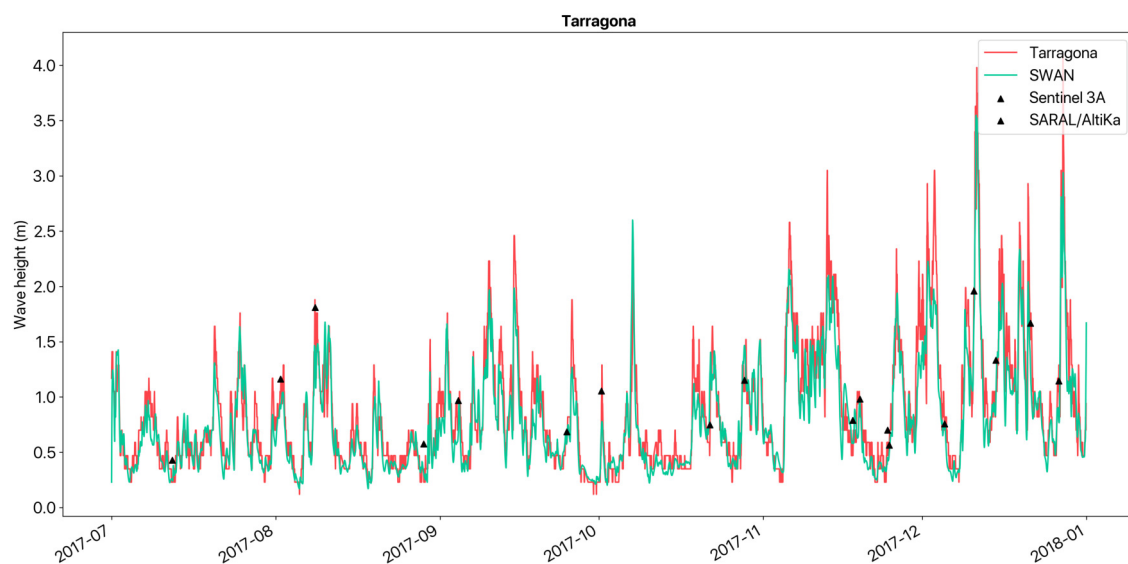
**Figura 5.34:** Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN



**Figura 5.35:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN

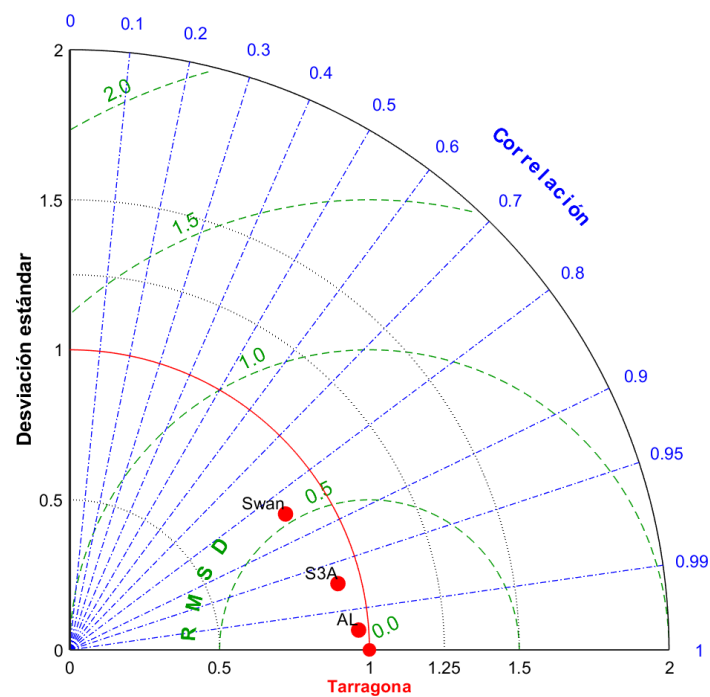
Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Tarragona	1.00	0.00	1.00
SWAN	0.85	0.52	0.85
Sentinel 3A	0.92	0.25	0.97
SARAL/AltiKa	0.97	0.07	1.00

**Tabla 5.14:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.36)



**Figura 5.36:** Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN





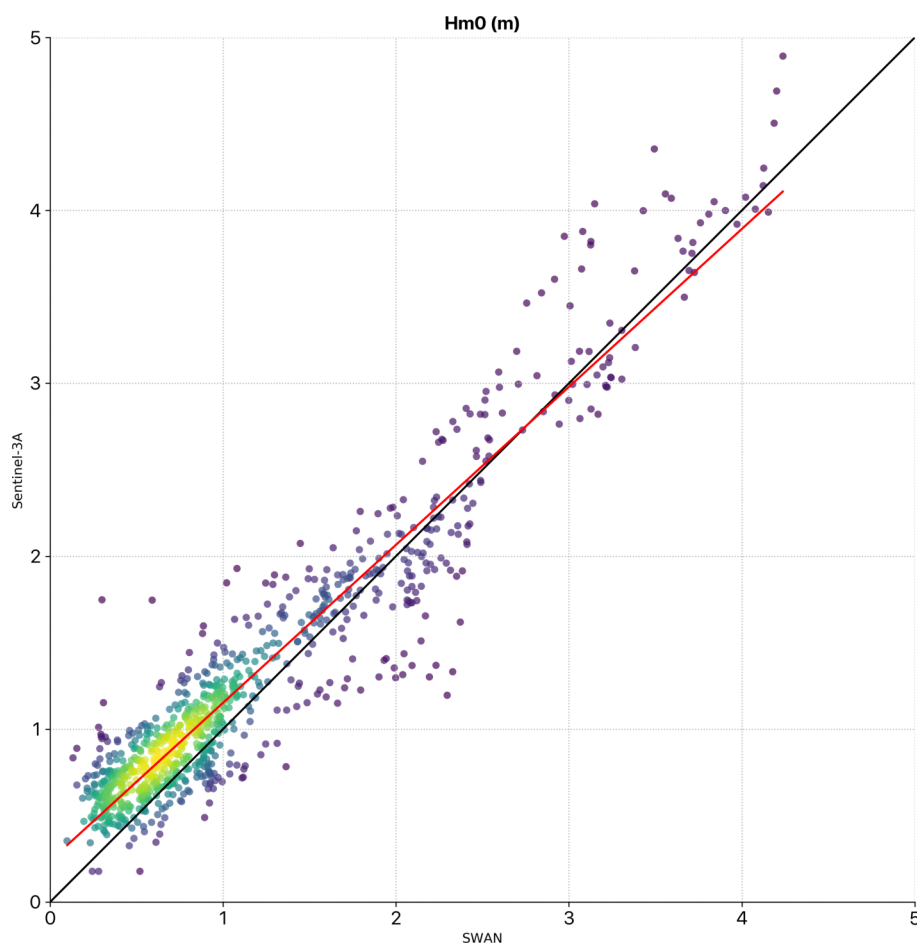
**Figura 5.37:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo de predicción SWAN

### 5.3.2. Comparación de la malla del modelo SWAN con las observaciones de satélite

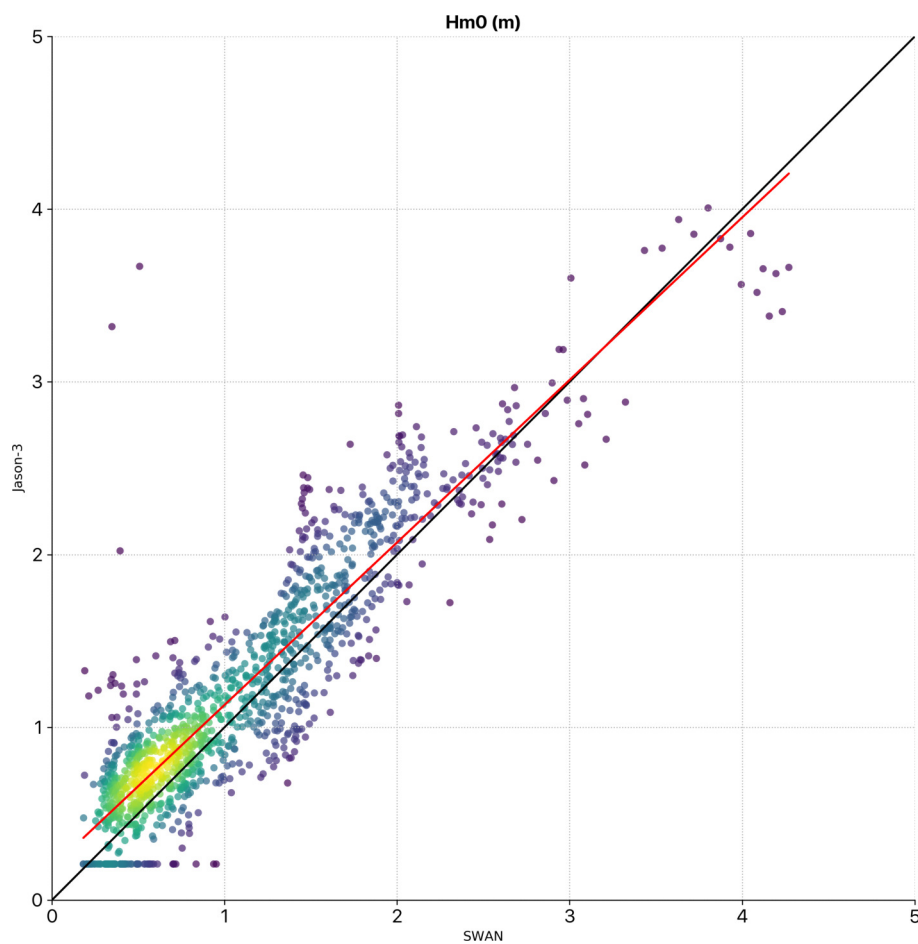
En este análisis se ha evaluado únicamente la zona del mar Balear (Figura 5.17), ya que es el dominio de la malla computacional utilizada en el modelo SWAN. El procedimiento es análogo al realizado anteriormente para el modelo Med-Waves.

Satélite	RMSE	bias	SI	Correlación (r)
Sentinel 3A	0.30	-0.13	0.23	0.95
Jason 3	0.34	-0.12	0.27	0.90
SARAL/AltiKa	0.31	-0.18	0.26	0.91

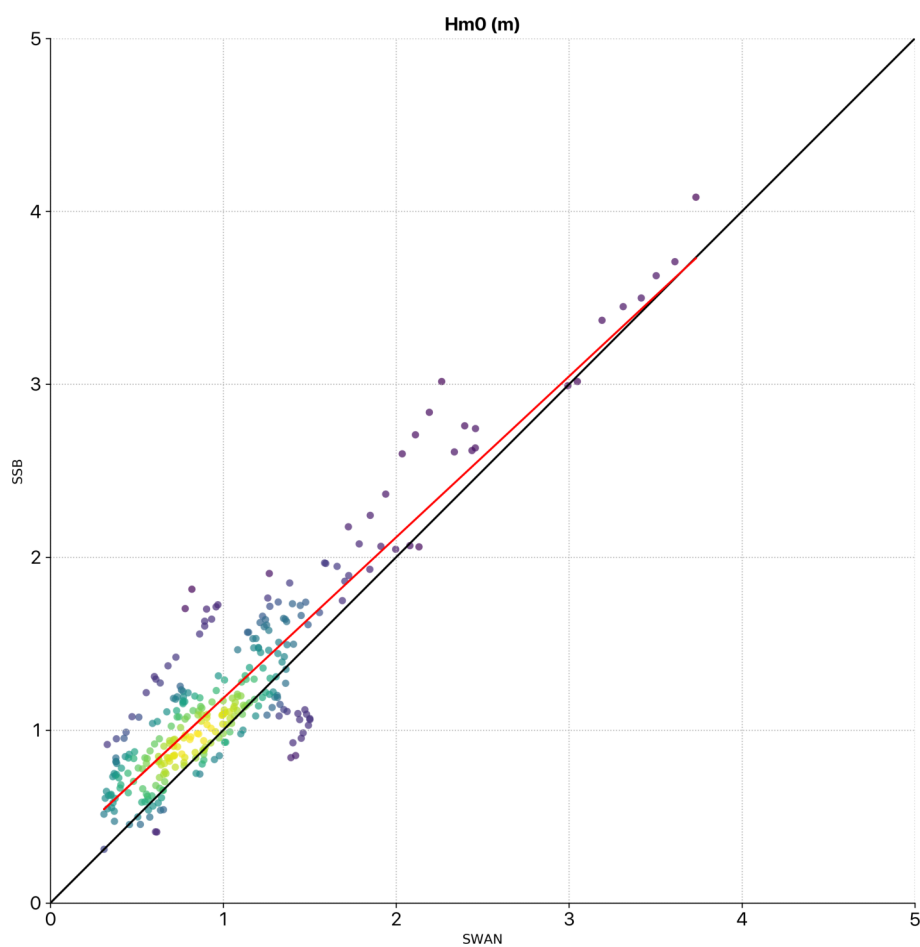
**Tabla 5.15:** Estadísticos de las dispersiones 5.38, 5.39 y 5.40 de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa frente al modelo SWAN para el mar Balear



**Figura 5.38:** Diagrama de dispersión entre el satélite Sentinel 3A y el modelo SWAN para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 913 puntos analizados



**Figura 5.39:** Diagrama de dispersión entre el satélite Jason 3 y el modelo SWAN para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 1300 puntos analizados

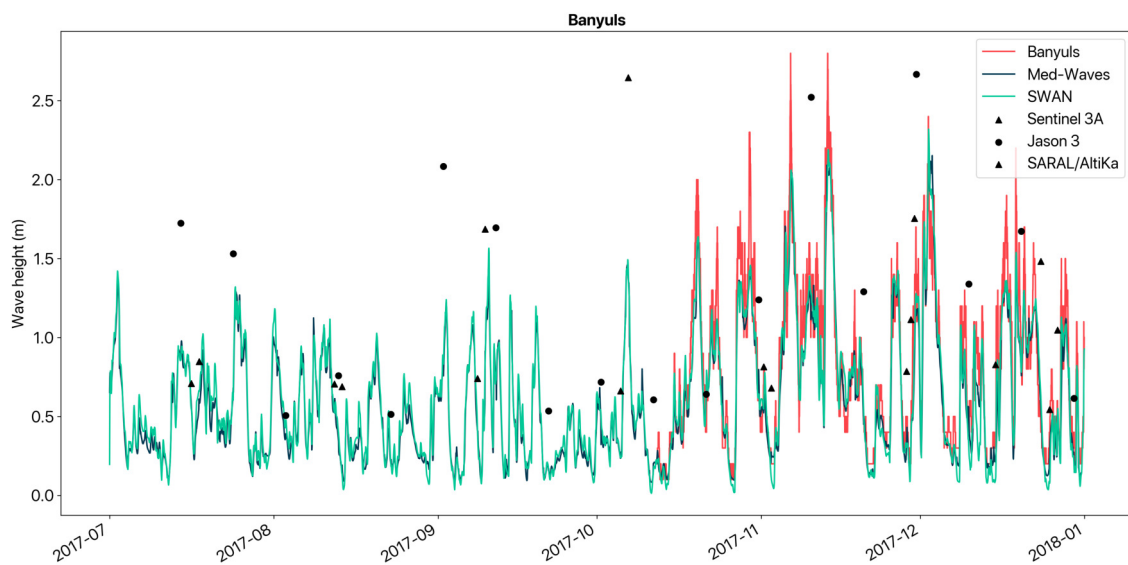


**Figura 5.40:** Diagrama de dispersión entre el satélite SARAL/AltiKA y el modelo SWAN para altura de ola en el mar Balear, de Julio a Diciembre de 2017. 312 puntos analizados

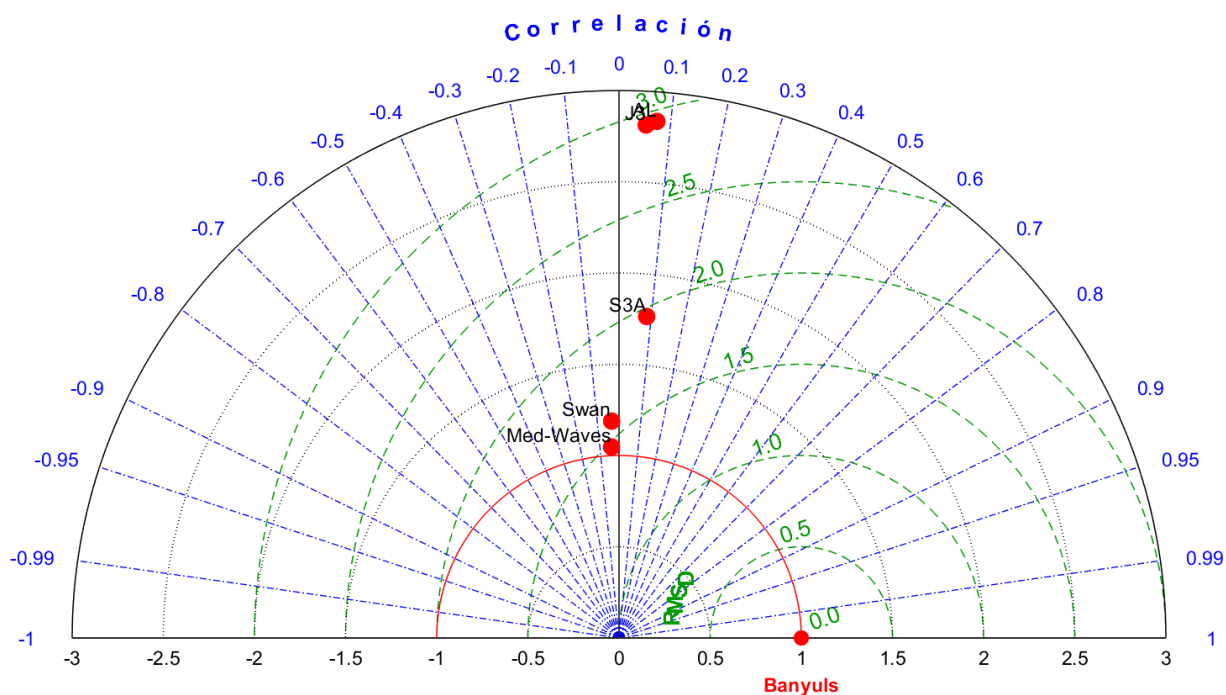
## 5.4. Intercomparación entre los modelos Med-Waves y SWAN

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Banyuls	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	1.05	1.48	-0.04
SWAN	1.19	1.61	-0.03
Sentinel 3A	1.77	1.86	0.09
Jason 3	2.82	2.9	0.05
SARAL/AltiKa	2.84	2.87	0.07

**Tabla 5.16:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Banyuls (Figura 5.41)



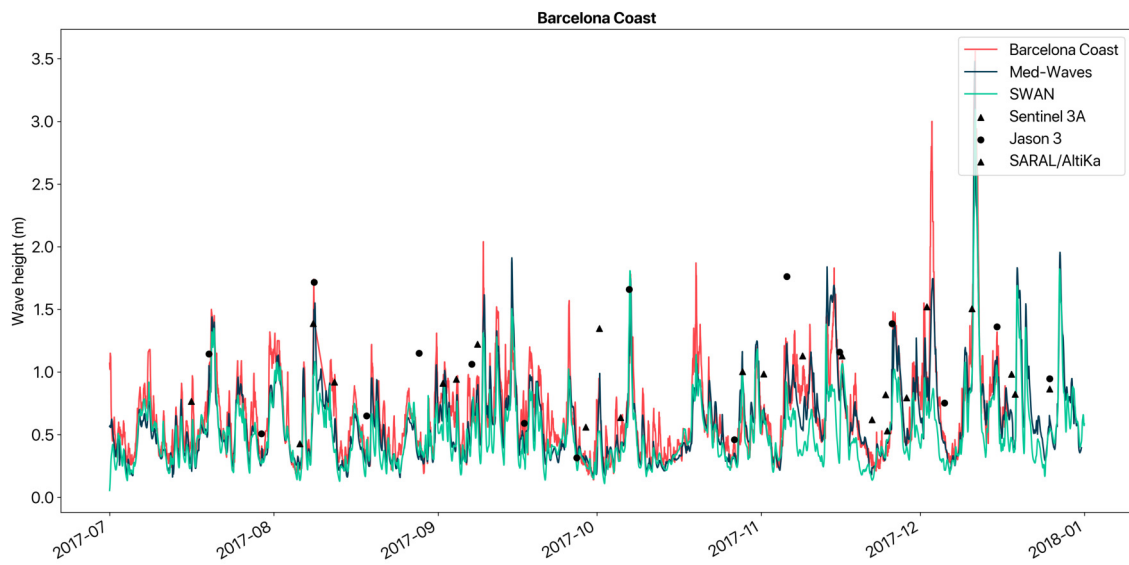
**Figura 5.41:** Serie temporal de la boya de Banyuls con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN



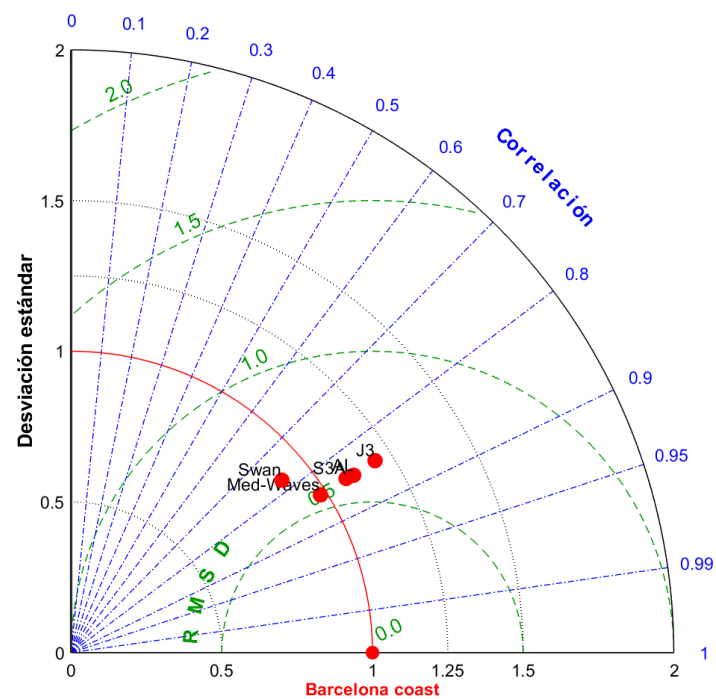
**Figura 5.42:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Banyuls y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Barcelona coast	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	0.98	0.58	0.85
SWAN	0.90	0.62	0.77
Sentinel 3A	1.08	0.55	0.84
Jason 3	1.19	0.57	0.85
SARAL/AltiKa	1.11	0.55	0.85

**Tabla 5.17:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya costera de Barcelona (Figura 5.43)



**Figura 5.43:** Serie temporal de la boya costera de Barcelona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN

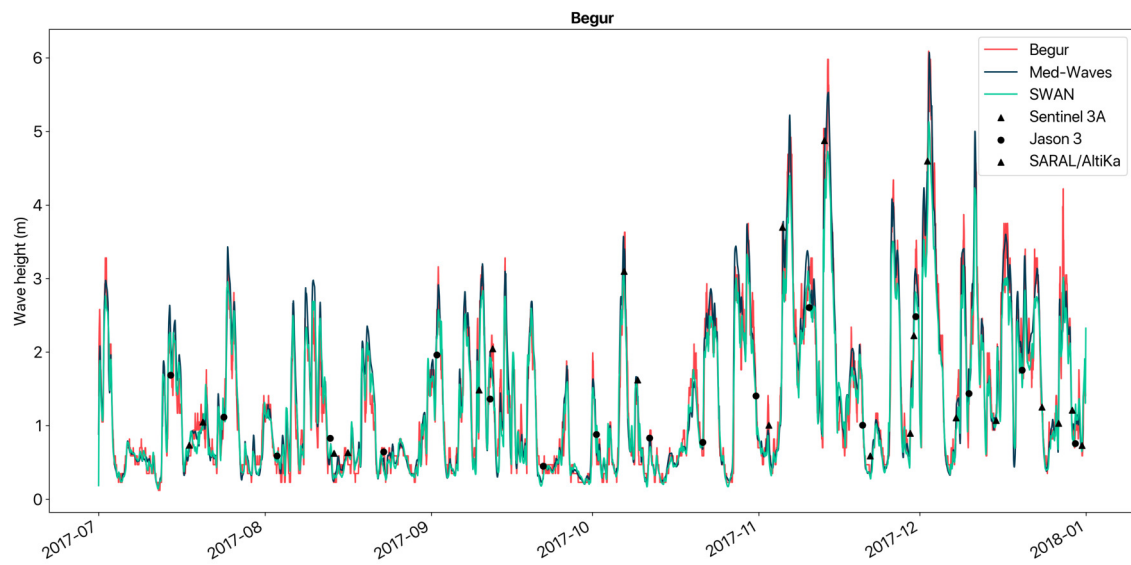


**Figura 5.44:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Barcelona y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN

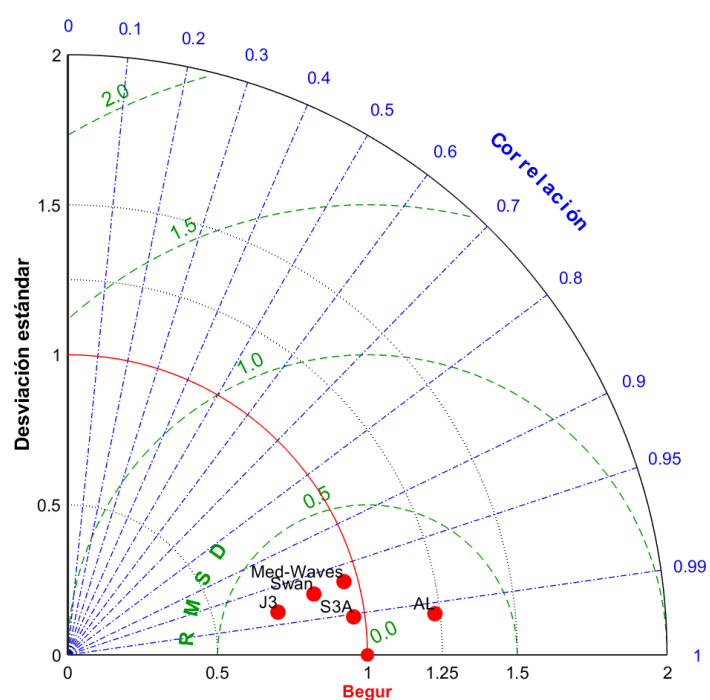


Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Begur	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	0.95	0.25	0.97
SWAN	0.85	0.28	0.97
Sentinel 3A	0.96	0.18	0.99
Jason 3	0.72	0.35	0.98
SARAL/AltiKa	1.23	0.29	0.99

**Tabla 5.18:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Begur (Figura 5.45)



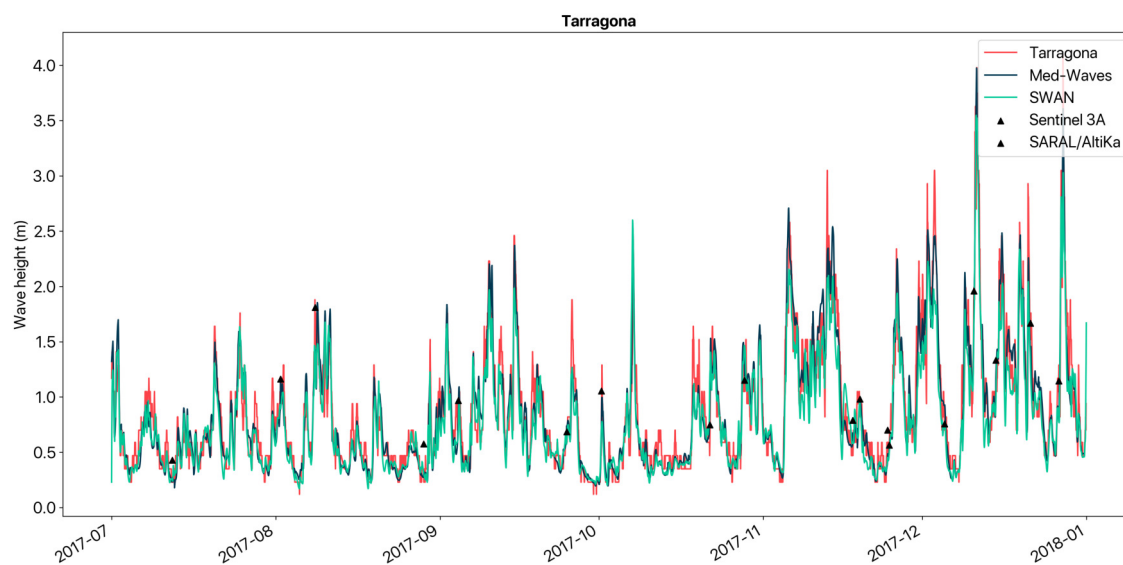
**Figura 5.45:** Serie temporal de la boya de Begur con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN



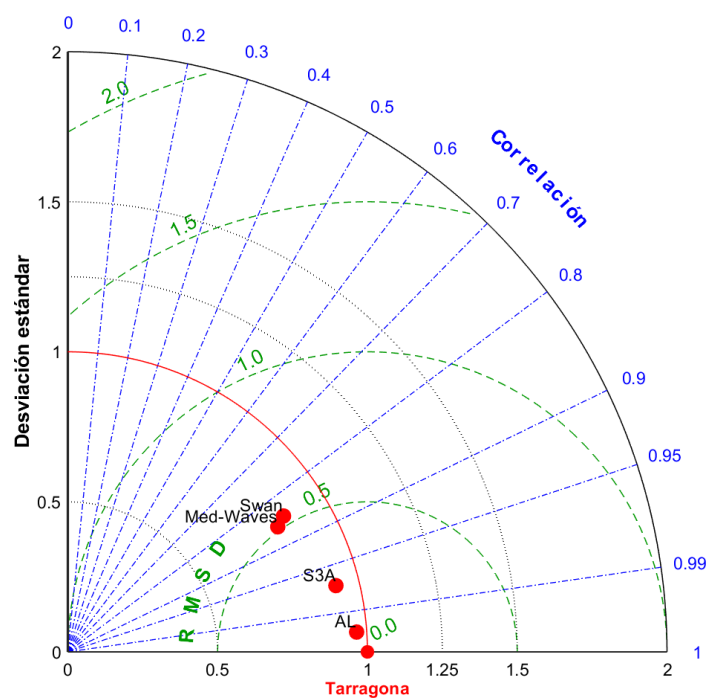
**Figura 5.46:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Begur y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN

Ítem	Desv. estándar	RMSD	Correlación (r)
Tarragona	1.00	0.00	1.00
Med-Waves	0.82	0.50	0.86
SWAN	0.85	0.52	0.85
Sentinel 3A	0.92	0.25	0.97
SARAL/AltiKa	0.97	0.07	1.00

**Tabla 5.19:** Estadísticos utilizados en el diagrama de Taylor de la boya de Tarragona (Figura 5.47)



**Figura 5.47:** Serie temporal de la boya de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN



**Figura 5.48:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa, el modelo Med-Waves y el modelo SWAN

# Discusión

Para analizar los resultados obtenidos, siguiendo el orden de exposición en el apartado de resultados, se pasa a su discusión en este capítulo.

## 6.1. Validación de las observaciones de satélite a partir de las medidas de boyas in situ

En el procedimiento de validación de observaciones de satélite a partir de las boyas in situ, donde se han mostrado las figuras correspondientes a las series temporales y los estadísticos del correspondiente diagrama de Taylor se puede deducir que hay un claro comportamiento distinguido entre las boyas cercanas a la línea de costa y las que se hallan mar adentro.

Únicamente se procede a discutir los resultados de los satélites principales Jason 3 y Sentinel 3A, relegando a la misión SARAL/AltiKA como satélite de apoyo. Cabe recordar que el número de muestras de este último satélite es bajo y puede resultar en estadísticos alejados de la realidad.

Centrándose en las boyas de Banyuls (Figura 5.1) y Barcelona costera (Figura 5.3), se observa que el comportamiento del satélite Jason 3 es ligeramente peor al de Sentinel 3A, cumpliendo el propósito por el que éste fue lanzado. Esta afirmación queda consolidada tras comprobar el resto de boyas costeras como Sète o Espiguette (Anejo de resultados), donde Jason 3 siempre tiende a sobrevalorar las alturas de oleaje en mayor medida que Sentinel 3A. En estas boyas costeras es donde se alcanzan los peores valores de correlación e incluso correlaciones negativas.

De todos modos, cabe destacar el comportamiento de las boyas costeras de Tarragona y Barcelona. Con unas distancias a la costa de 1.1 km y 3.2 km respectivamente, los satélites logran conseguir lecturas válidas, con correlaciones a partir de 0.6 y llegando a un sorprendente 0.84 para la boya de Barcelona costera. Aún cabe esperar a tener más resultados de la misión secundaria SARAL/AltiKa, pues las observaciones son aún mayores para este último satélite. Esta reflexión plantea la posibilidad de que sea probable que las mediciones de satélite cerca de la costa quizás no sólo estén influenciadas por la distancia a tierra, sino por la geometría de ésta frente a la órbita del satélite, ya que explicaría el mal comportamiento para zonas como la del golfo de Lion y el buen comportamiento en la costa de Barcelona.

Para boyas alejadas de la costa como Begur, Sa Dragonera, Valencia y Tarragona (Anejo de resultados) se observan la mejor de las mediciones ofrecidas por los satélites, con correlaciones

cercanas a la unidad y errores bajos. Aquí vemos como en la boya de Begur, Sentinel 3A se obtiene una correlación de 0.99, la más alta de las obtenidas en todo el estudio (Figura 5.5 y Tabla 5.3. Jason 3, a diferencia de su comportamiento observado en boyas costeras, responde de manera similar para boyas profundas, pero siempre a la par o ligeramente por debajo de Sentinel 3A.

## **6.2. Validación de las predicciones del modelo Med-Waves a partir de las medidas in situ y satélite**

Como ya se expuso anteriormente, el producto correspondiente a la predicción del oleaje en el Mediterráneo fue cambiado durante el transcurso de este trabajo, por lo que fue necesario un reanálisis de todos los resultados con el nuevo producto. De todas maneras, se decidió no incluir aquí el resultado de la versión anterior para mostrar la mejora conseguida en la predicción. En ambos casos, se realizó una comparativa en todo el dominio del Mediterráneo en primer término, para pasar a una comparativa de detalle en el mar Balear y poder relacionar los comportamientos.

Con el producto actual (*MEDSEA ANALYSIS FORECAST WAV 006 017*), es evidente notar diferencias significativas respecto al anterior, ya que se ha logrado una mejora global al corregir los coeficientes de disipación por *whitecapping*. El modelo Med-Waves logra una buena respuesta, con un comportamiento parejo al de los satélites en cuanto a valores estadísticos obtenidos. Observando los diagramas de Taylor, se comprueba como el modelo nunca otorga valores peores a cualquiera de los satélites, obteniendo mejores respuestas cuando no hay eventos de tormenta, donde difiere subprediciendo valores respecto a la medición de la boya.

Observando el diagrama de dispersión, tanto para el dominio amplio del mar Mediterráneo como para el reducido del mar Balear, la regresión de valores es similar en ambos casos, notándose como en el ámbito reducido los valores dejan de ser tan aptos y toman una tendencia a la subpredicción (Figuras 5.18 y 5.21).

En las figuras siguientes referidas a la distribución espacial de altura de ola (de la Figura ?? hasta 5.29) se puede ver el comportamiento de los satélites Sentinel 3A y Jason 3 durante intervalos de mar en calma y intervalos con eventos de tormenta. En los primeros casos, el modelo llega a ser indistinguible de las trazas de los satélites, mientras que en eventos de gran energía como el de Noviembre de 2017 (alturas de ola de 5 metros en Begur) se pueden apreciar las diferencias en los valores observados entre el modelo y los satélites.

## **6.3. Validación del modelo de alta resolución implementado en SWAN a partir de las medidas in situ y satélite**

A partir de las series temporales y diagramas de Taylor, se observa un comportamiento del modelo donde suceden muchos casos de subpredicción de valores de altura de ola, siendo un caso destacable el de la boya costera de Barcelona (Figura 5.32), donde en todo el período de estudio el modelo no consigue asemejar su resultado con el valor observado. En Banyuls (Figura 5.30) ocurre con la misma magnitud, pero cuando se analizan boyas profundas como Begur (Figura 5.34) el

fenómeno tiende a afectar en menor medida, y se consigue una correlación alta (0.97).

En los resultados de comparación de múltiples puntos de la malla computacional, cabe tener presente la longitud de la muestra analizada, ya que la malla de salida del modelo SWAN comprende una zona reducida. La magnitud de la malla no causa un problema *per se*, sino que el problema viene dado por la superficie expuesta a las órbitas de los satélites. En cualquier caso, se han conseguido analizar aproximadamente 1000 puntos por cada satélite, con lo que la dispersión debe mostrar alguna tendencia sobre el comportamiento del modelo sobre la que establecer un análisis. En los diagramas de dispersión (Figuras 5.38 y 5.39) se observa el mismo fenómeno visto en las series temporales, donde la altura de ola queda por debajo de la observada por el satélite en mayor magnitud.

## 6.4. Intercomparación entre los modelos Med-Waves y SWAN

No se ha querido incluir en los resultados la representación de mapas de altura de ola, que han quedado adjuntados en el anejo. En estos mapas puede verse representado el resultado del modelo SWAN sobre el resultado del modelo CMEMS en los límites Norte, Este y Sur. En estos mapas se puede apreciar que debido a la imposición de las condiciones de contorno en los límites Norte, Este y Sur procedentes de CMEMS la similaridad es inequívoca, también ayudada por el uso de los datos de campos de viento con la misma procedencia para ambos modelos (ECMWF). El único análisis que respalda la validez de estos mapas corresponde a la comparación entre la malla y las observaciones de satélite.

Para el modelo SWAN se han analizado, aproximadamente, una décima parte de los puntos analizados para la malla de la predicción de CMEMS. De todas maneras, se aprecia un comportamiento válido y similar entre modelos, aunque se observa una de los matices que llegan a caracterizar al modelo SWAN como la leve subestimación de alturas de ola, apreciable para los diagramas de dispersión de los tres satélites, donde el fenómeno se da a cabo por igual.

Aunque las condiciones iniciales en los contornos laterales del dominio se hayan anidado a partir de la predicción Med-Waves de CMEMS, y los resultados sean parecidos con dicha predicción, se observa un comportamiento ligeramente más desfavorable en la malla calculada por SWAN, donde los incrementos del error cuadrático medio y la correlación más baja inducen a que sea necesario un ajuste del modelo, como mínimo, para poder garantizar el buen comportamiento del modelo grosero de CMEMS.

En el análisis de los resultados obtenidos en las boyas, también se produce una reducción en la cantidad de puntos de la muestra, ya que del total de 14 boyas analizadas para el mar Balear, sólo 5 quedan dentro de la malla computacional del modelo SWAN. Además, la boya de Tarragona costera, debido a su proximidad a la costa y a las características de la batimetría, ha quedado fuera de los cálculos de SWAN, restando a sólo 4 boyas disponibles para la comparación (Banyuls, Barcelona costera, Begur y Tarragona).

Tanto en Sentinel 3A, Jason 3 y Saral/AltiKa se obtiene el mismo comportamiento observado para el análisis del modelo de CMEMS. Las boyas más alejadas de la costa obtienen los mejores resultados, llegando a coeficientes de correlación superiores al 0.95 como en el caso de Begur, y el

modelado resulta muy válido para todos estos puntos.

Para la boya más cercana a la costa analizada en este apartado (Banyuls, Figura 5.41), se observa como el modelo, aunque resultando valores no tolerables, mejora las observaciones obtenidas por los satélites. En cambio, para Barcelona costera y pese a la cercanía a la costa, se detecta un comportamiento cuasi parejo entre los satélites y el modelo SWAN, disminuyendo la correlación y aumentando el error cuadrático medio aunque en menor medida, dando a cabo un resultado bastante válido.



# Conclusiones

En este apartado se proceden a presentar las conclusiones en respuesta a los objetivos definidos en el capítulo 3.

Las observaciones de satélite frente a las observaciones de plataformas in situ como las boyas ofrecen un gran avance en el alcance de las mediciones en todos los océanos del mundo: se obtienen múltiples mediciones según vaya orbitando la nave alrededor del planeta. Esta ventaja en cuanto a la movilidad espacial tiene el inconveniente de ofrecer una menor precisión en las mediciones de altura de ola.

Los resultados de la validación de los datos de satélite con las boyas demuestran que pueden ser aceptados como instrumentos válidos para la observación de alturas de ola, ya que se obtienen valores cercanos a los medidos por la boya. En los casos de boyas muy cercanas a la costa, se detecta que los valores de satélite empiezan a alterarse respondiendo con observaciones sobrevaloradas.

Todas las boyas cercanas a la costa con los peores resultados en la validación corresponden al golfo de Lion, al sur de Francia. Aun así, se ha observado el caso de varias boyas en particular donde dos de los tres satélites no han respondido tan mal a la observación como el satélite restante, lo que induce a preguntarse si, además de la cercanía a la costa, influye la forma geométrica de ésta frente a la órbita trazada por el satélite, o a los ciclos de órbita. Debería plantearse un análisis donde se analice en detalle la trayectoria dibujada por el satélite y la forma de la costa cercana a la boya, para determinar en qué casos el satélite empieza a detectar puntos no válidos (suponiéndolos como puntos de tierra) y da valores desviados.

Esta afirmación está basada en el análisis realizado a pequeña escala en el Mediterráneo, por lo que quedaría esperar a otros estudios en diferentes zonas del planeta para verificar la validez de la hipótesis, o bien a los futuros lanzamientos de satélites de alta resolución como SWOT [Srinivasan, 2017].

La misión de apoyo SARAL/AltiKa frente a las misiones principales Sentinel 3A y Jason 3 ha aportado nuevos valores muy precisos de altura de ola, incluso en boyas cercanas a la costa. El reducido intervalo temporal disponible ha hecho imposible el análisis al mismo nivel que el resto de satélites, pero los resultados obtenidos hasta ahora parecen indicar un buen comportamiento, incluso mejorando al de Sentinel 3A.

Además del comportamiento en función de la distancia a la costa, en las observaciones obtenidas se ha detectado un patrón común en las mediciones de los altímetros de los satélites, con lo

que podría establecerse un protocolo de corrección mediante las boyas con el que aproximar las observaciones al valor real, tal y como se hizo con la puesta en órbita de Jason 3, donde se calibró gracias a las mediciones del satélite anterior Jason 2. Con una calibración parecida pero realizada mediante proceso de colocación mediante las boyas se podrían obtener muy precisas y reducir los errores medios hasta órdenes de magnitud de centímetros.

En cuanto al análisis de los modelos de predicción, se observa cómo el modelo Med-Waves está muy bien optimizado para la zona estudiada, y el posterior modelo anidado basado en SWAN ha respondido ligeramente peor, aunque las diferencias sean muy reducidas. Las condiciones iniciales del modelo anidado en SWAN están tomadas del modelo grosero Med-Waves, entonces queda por descubrir qué factor es el determinante para dicha minoración en el resultado del modelo SWAN frente el modelo Med-Waves. Se debe destacar que el modelo Med-Waves está específicamente diseñado para el mar Mediterráneo, y en las simulaciones con el modelo SWAN se han tomado gran parte de valores por defecto, por lo que una optimización del modelo SWAN no requeriría grandes esfuerzos a la hora de preparar el modelado y podría mejorar su resultado.

# Bibliografía

- [A Sánchez-Arcilla, 2014] A Sánchez-Arcilla, J Wolf, J. M. (2014). Oceanography at coastal scales: Introduction to the special issue and results from the eu fp7 field ac project. *Continental Shelf Research*, 87:1–6.
- [A Sánchez-Arcilla, 2008] A Sánchez-Arcilla, D Gonzalez-Marco, R. B. (2008). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8:1217–1228.
- [Alomar, 2012] Alomar, M. (2012). *Improving wave forecasting in variable wind conditions. The effect of resolution and growth rate for the Catalan coast*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [Battjes and Janssen, 1978] Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M. (1978). *Energy Loss and Set-Up Due to Breaking of Random Waves*.
- [Bengt Karlson et al., 2009] Bengt Karlson, P. A., Funkquist, L., Kaitala, S., and Sørensen, K. (2009). Infrastructure for marine monitoring and operational oceanography. [https://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.20711!/RO\\_39%5B1%5D.pdf](https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.20711!/RO_39%5B1%5D.pdf). Accedido: 2017-12-12.
- [Bolaños, 2004] Bolaños, R. (2004). *Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [Bolaños et al., 2009] Bolaños, R., Jordà, G., Cateura, J., Lopez, J., Puigdefabregas, J., Gomez, J., and Espino, M. (2009). The xiom: 20 years of a regional coastal observatory in the spanish catalan coast. *Journal of marine systems*, 77(3):237–260.
- [Brown et al., 2013] Brown, S., Nicholls, R. J., Woodroffe, C. D., Hanson, S., Hinkel, J., Kebede, A. S., Neumann, B., and Vafeidis, A. T. (2013). *Sea-Level Rise Impacts and Responses: A Global Perspective*, pages 117–149. Springer Netherlands, Dordrecht.
- [Buckley et al., 1984] Buckley, W., Pierce, R., Peters, J., and Davis, M. (1984). Use of the half-cycle analysis method to compare measured wave height and simulated gaussian data having the same variance spectrum. *Ocean Engineering*, 11(4):423 – 445.
- [CNES, 2018] CNES (2018). CNES - SARAL/altiKa. <https://altika-saral.cnes.fr/en/SARAL/index.htm>. Accedido: 2018-04-06.

- [Copernicus, 2017] Copernicus (2017). Copernicus - Marine environment monitoring service. <http://marine.copernicus.eu/about-us/about-eu-copernicus/>. Accedido: 2017-10-25.
- [ESA, 2017] ESA (2017). ESA - Sentinel 3. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3>. Accedido: 2017-12-06.
- [Ewing, 1971] Ewing, J. A. (1971). A numerical wave prediction method for the north atlantic ocean. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 24(6):241–261.
- [G. Korres et al., 2017] G. Korres, M. R., Zacharioudaki, A., Chalkiopoulos, A., Denaxa, D., and Lecc, R. (2017). CMEMS - Mediterranean sea waves analysis and forecast. product user manual (CMEMS-MED-PUM-006-017). <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-MED-PUM-006-017.pdf>. Accedido: 2017-11-10.
- [Goda, 1986] Goda, Y. (1986). Effect of wave tilting on zero-crossing wave heights and periods. *Coastal Engineering in Japan*, 29(1):79–90.
- [Gracia V. et al., 2014] Gracia V., G.-L. M., Sánchez-Arcilla, A., Gault, J., Oller, P., Fernandez, J., Sairouni, A., Cristofoli, E., and Toldra, R. (2014). A new generation of early warning system for coastal risk. the icoast project. *International Conference in Coastal Engineering*.
- [Gunther H, 2012] Gunther H, B. A. (2012). The wam model – validation document version 4.5.4.
- [H Sepulveda, 2014] H Sepulveda, P Queffeuilou, F. A. (2014). Evaluation of saral/altika observations of small (<1.5m) significant wave height: Comparison with buoy and jason-2 data”. The WISE 2014 meeting - Waves in Shallow Water Environment.
- [Hales, 2007] Hales, S. (2007). Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 37:976.
- [Hasselmann et al., 1973] Hasselmann, K., P. Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., E. Cartwright, D., Enke, K., A Ewing, J., Gienapp, H., E. Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., and Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap). 8:1–95.
- [Hasselmann and Hasselmann, 1985] Hasselmann, S. and Hasselmann, K. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. part i: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11):1369–1377.
- [Hasselmann et al., 1988] Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P., Komen, G., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., C. Cardone, V., A. Greenwood, J., Reistad, M., Zambresky, L., and A. Ewing, J. (1988). The wam model - a third generation ocean wave prediction model. 18:1775–1810.

- [Hernandez et al., 2015] Hernandez, F., Blockley, E., Brassington, G. B., Davidson, F., Divakaran, P., Drévilion, M., Ishizaki, S., Garcia-Sotillo, M., Hogan, P. J., Lagemaa, P., Levier, B., Martin, M., Mehra, A., Mooers, C., Ferry, N., Ryan, A., Regnier, C., Sellar, A., Smith, G. C., Sofianos, S., Spindler, T., Volpe, G., Wilkin, J., Zaron, E. D., and Zhang, A. (2015). Recent progress in performance evaluations and near real-time assessment of operational ocean products. *Journal of Operational Oceanography*, 8(sup2):s221–s238.
- [Holthuijsen and Boer, 1988] Holthuijsen, L. and Boer, S. (1988). Wave forecasting for moving and stationary targets. pages 231–234.
- [Holthuijsen, 2007] Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- [ISRO, 2018] ISRO (2018). SARAL - ISRO. <https://www.isro.gov.in/Spacecraft/saral>. Accedido: 2018-05-10.
- [J.P. Dumont et al., 2017] J.P. Dumont, V. R., Carrere, L., Picot, N., Bronner, E., Couhert, A., Guillot, A., Desai, S., and Bonekamp, H. (2017). NOAA - jason 3 product handbook. [http://www.ospo.noaa.gov/Products/documents/hdbk\\_j3.pdf](http://www.ospo.noaa.gov/Products/documents/hdbk_j3.pdf). Accedido: 2017-11-03.
- [Komen et al., 1994] Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., and Janssen, P. A. E. M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press.
- [Komen et al., 1984] Komen, G. J., Hasselmann, K., and Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8):1271–1285.
- [Lozano, 2017] Lozano, P. (2017). Especial oceanografía operacional - instituto español de oceanografía. [http://www.ieo.es/documents/10640/32146/REVISTA\\_IEO-24.pdf](http://www.ieo.es/documents/10640/32146/REVISTA_IEO-24.pdf). Accedido: 2017-11-09.
- [Lévesque, 2018] Lévesque, N. (2018). Canadian space agency - the surface water and ocean topography (swot) mission. <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/swot.asp>. Accedido: 2018-01-18.
- [Mecklenburg, 2017] Mecklenburg, S. (2017). Sentinel 3 user handbook. [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685236/Sentinel-3\\_User\\_Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685236/Sentinel-3_User_Handbook). Accedido: 2017-10-30.
- [Ministerio de Fomento, 2017] Ministerio de Fomento (2017). Puertos del Estado - Predicción de oleaje, nivel del mar; boyas y mareógrafos. <http://www.puertos.es/ca-es/oceanografia/Pagines/portus.aspx>. Accedido: 2018-05-04.
- [NASA, 2017] NASA (2017). Jet Propulsion Laboratory - Jason 3. <https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/jason3/>. Accedido: 2017-11-03.

- [Pallarès, 2016] Pallarès, E. (2016). *High-resolution wave forecasting: the Catalan coast case: modeling, coupling and validation*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [Peter Janssen, 2018] Peter Janssen, Ø. B. (2018). MyWave | ECMWF. <https://www.ecmwf.int/en/research/projects/mywave>. Accedido: 2018-06-12.
- [Peth, 2018] Peth, J. (2018). National oceanographic partnership program – promoting partnerships for the future of the ocean, coasts and great lakes. <http://www.nopp.org/>. Accedido: 2018-06-12.
- [Ramamurthy, 2017] Ramamurthy, M. (2017). NetCDF. <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/>. Accedido: 2017-09-16.
- [Sobczak, 2017] Sobczak, D. (2017). Esfri. <http://www.esfri.eu/esfri-monitoring-system-esfri-mos>. Accedido: 2017-09-02.
- [Srinivasan, 2017] Srinivasan, M. (2017). NASA SWOT - Home. <https://swot.jpl.nasa.gov/>. Accedido: 2018-01-17.
- [Sverdrup, 1946] Sverdrup, H. U. (1946). Empirical and theoretical relations between wind, sea, and swell. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(6):823–827.
- [SWAMP Group, 1985] SWAMP Group (1985). *Ocean wave modeling / edited by SWAMP Group*. Plenum Press New York.
- [Taylor, 2001] Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7):7183–7192.
- [The SWAN Team, 2018] The SWAN Team (2018). *SWAN User manual*. Delft University of Technology.
- [Vassal, 2017] Vassal, C. (2017). ARGOS. <http://www.argos-system.org/argos/who-we-are/our-perspectives/>. Accedido: 2017-11-22.
- [Young, 1988] Young, I. (1988). A shallow water spectral wave model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93(C5):5113–5129.

# Nomenclatura

API	Application Programming Interface
BSBT	Backward Space Backward Time
CMEMS	Copernicus Marine Environment Service
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
DORIS	Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EEA	European Environment Agency
EMODnet	European Marine Observation and Data Network
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
EUROGOOS	European Global Ocean Observing System
FTP	File Transfer Protocol
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GPS	Global Positioning Service
HCMR	Hellenic Centre for Marine Research
HELCOM	The Baltic Marine Environment Protection Commission
IEO	Instituto Español de Oceanografía

Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
LTP	Light Particle Telescope
MFC	Monitoring and Forecasting Centre
NASA	National Aeronautics and Space Agency
NetCDF	Network Common Data Form
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
QuID	Quality Information Document
REMPEC	Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea
RMSE	Root Mean Square Error
SAR	Synthetic Aperture Radar
SI	Scatter Index
SLA	Service Level Agreement
SOCIB	Servei d'Observació Costanera de les Illes Balears
SORDUP	
SWAN	Simulating WAVes Nearshore
SWOT	Surface Water Ocean Topography
TAC	Thematic Assembly Center
UNEPMAP	Coordinating Unit for the Mediterranean Action Plan Secretariat to the Barcelona Convention and its Protocols
WAM	Wave Amplitude Model



# Anejo de resultados

## Boyas

En este anejo se incluyen los resultados obtenidos en una selección de boyas que no han sido expuestas en el capítulo 5, para la comparación de las boyas frente a los satélites y frente al modelo Med-Waves.

Se incluyen los resultados obtenidos en la comparación entre las observaciones de altura de ola obtenidas mediante los satélites Jason 3, Sentinel 3A y la misión complementaria SARAL/AltiKa, para el periodo comprendido entre Julio y Diciembre de 2017.

Se muestran los resultados de algunas boyas del Golfo de Lion (Figura 7.1) (Espiguette, Leucate, Porquerolles y Sète), y el resto de boyas del mar Balear (Sa Dragonera, Maó, Tarragona costera y València).

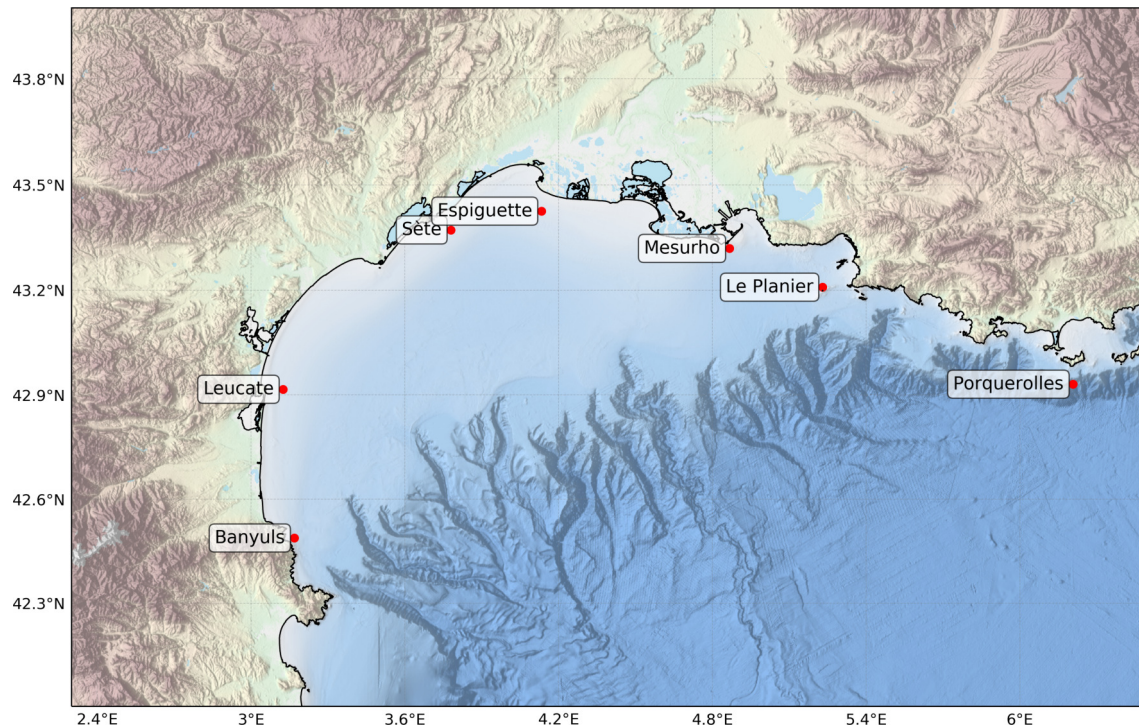
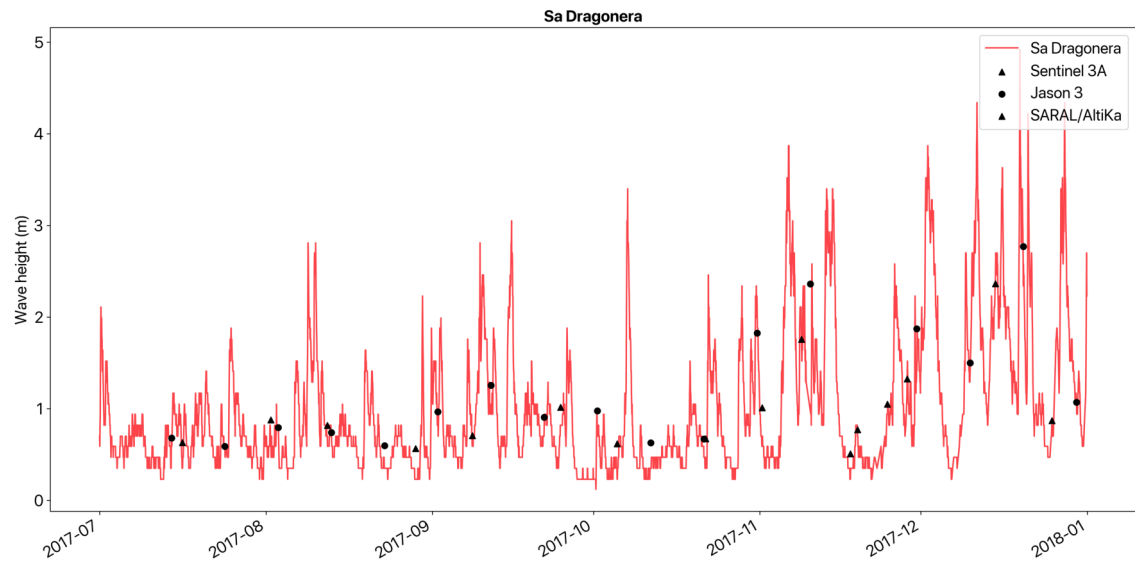
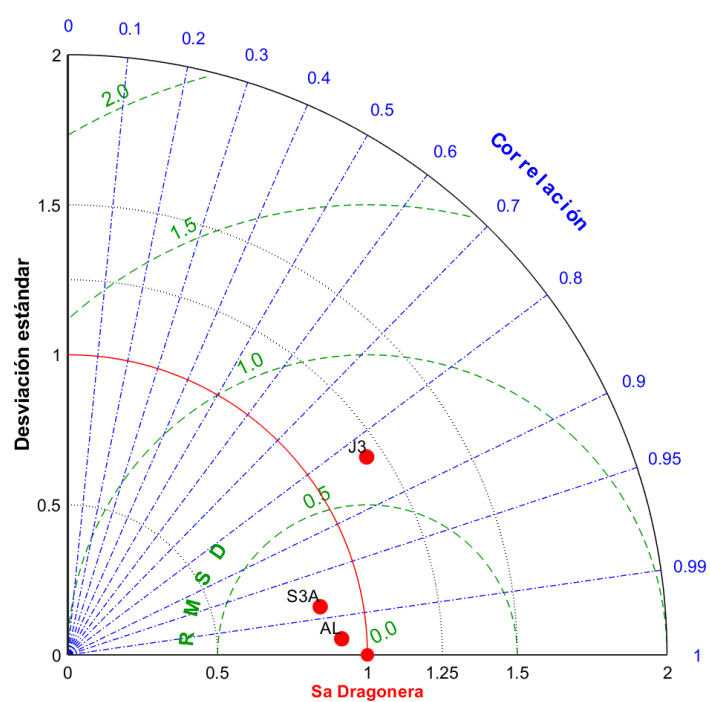


Figura 7.1: Mapa detalle del Golfo de Lion y situación de las boyas oceanográficas francesas

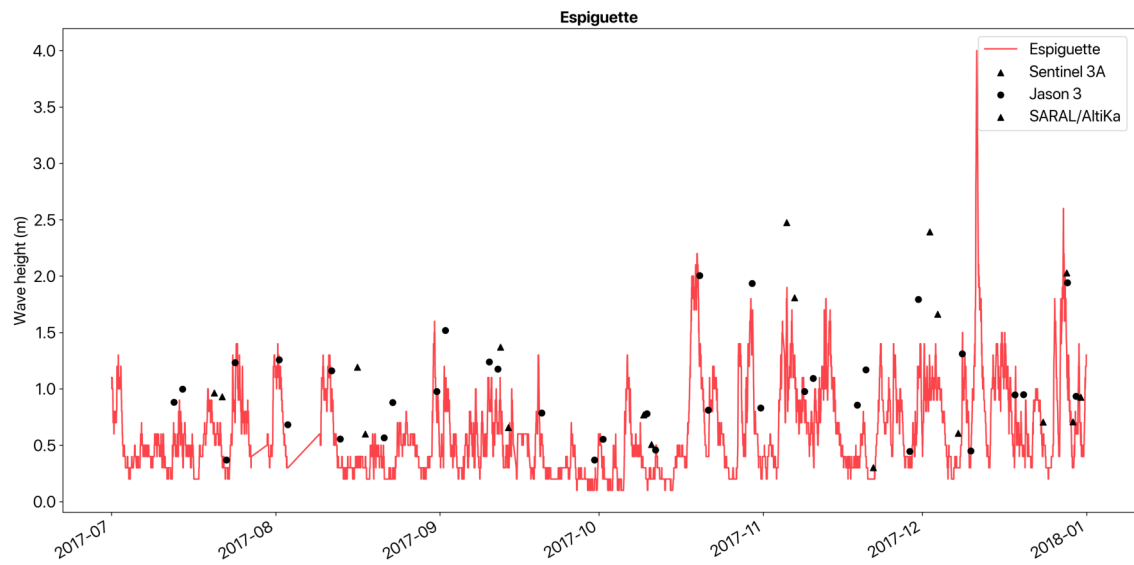
## Validación de las observaciones de satélite a partir de las medidas de boyas in situ



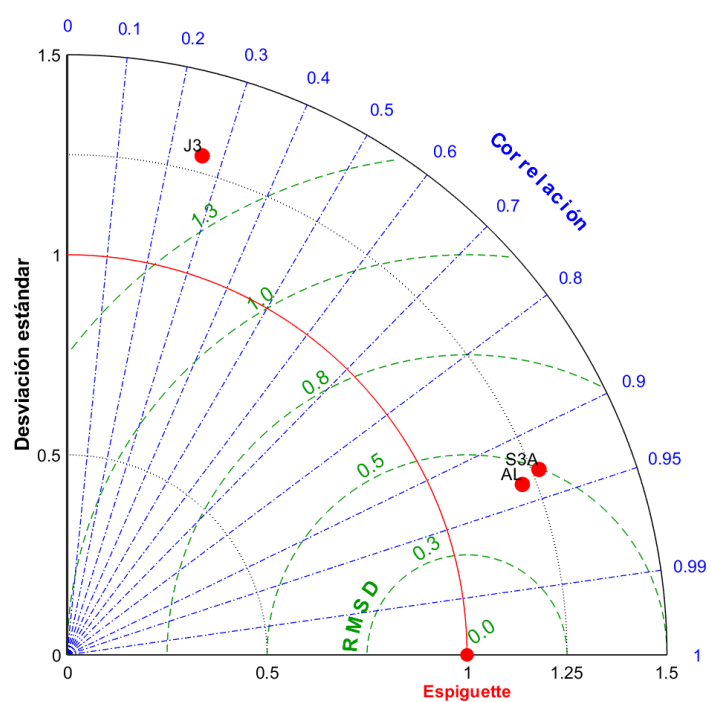
**Figura 7.2:** Serie temporal de la boyas de Sa Dragonera con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



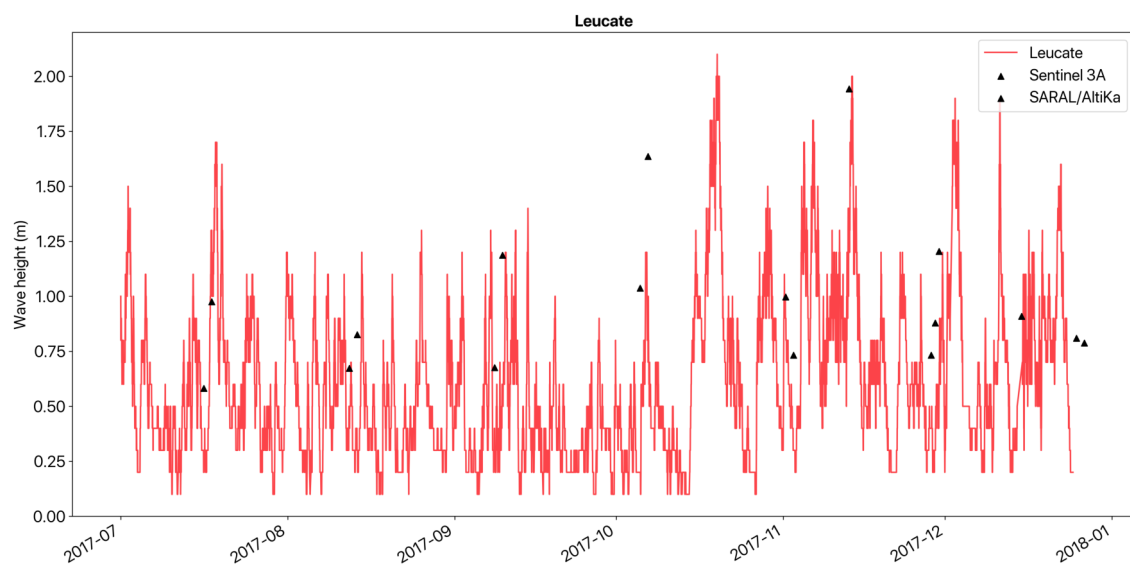
**Figura 7.3:** Diagrama de Taylor para la altura significante de ola entre la boyta de Sa Dragonera y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



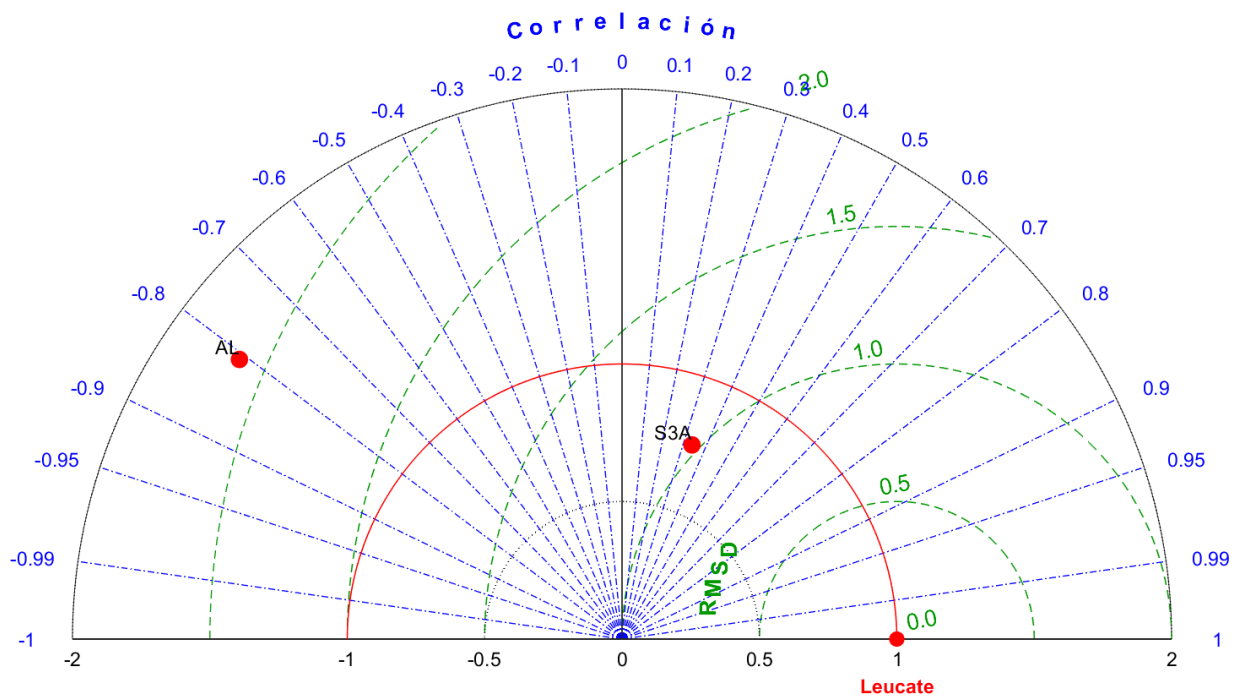
**Figura 7.4:** Serie temporal de la boya de Espiguette con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



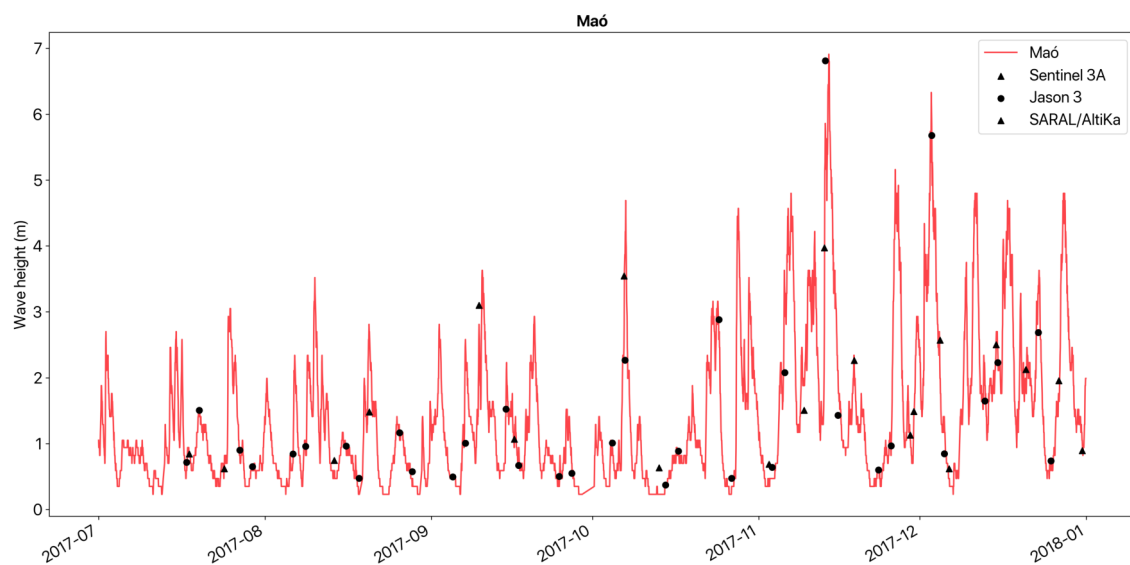
**Figura 7.5:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Espiguette y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



**Figura 7.6:** Serie temporal de la boya de Leucate con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa

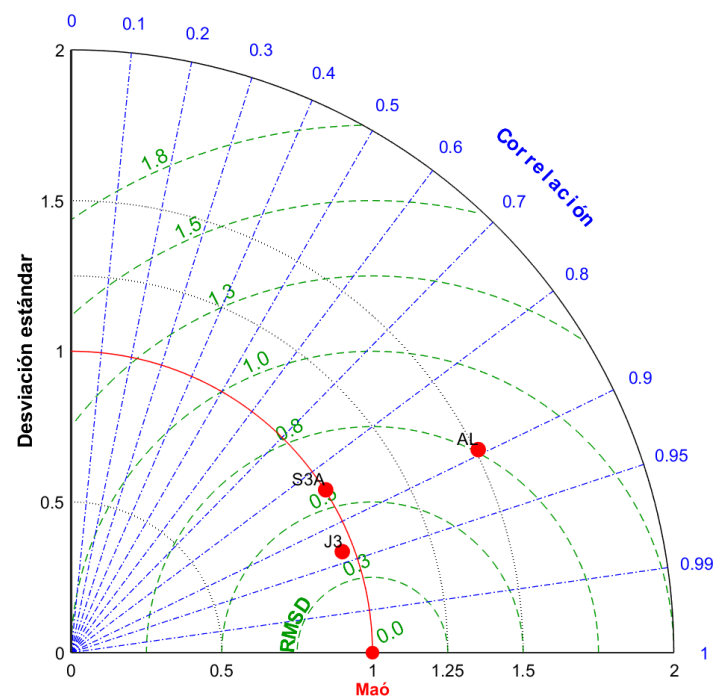


**Figura 7.7:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Leucate y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa

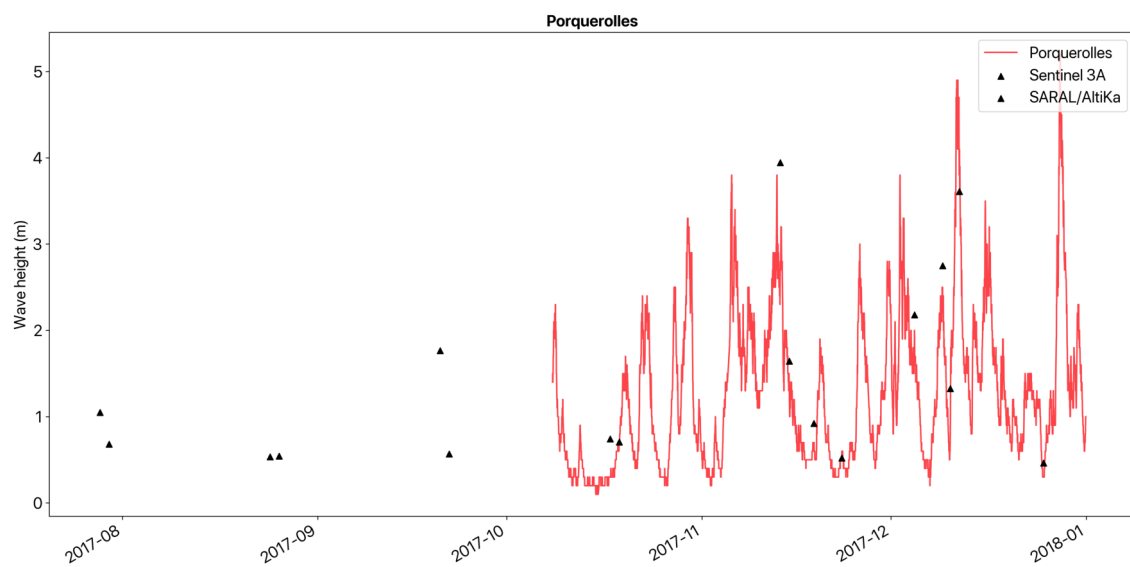


**Figura 7.8:** Serie temporal de la boya de Maó con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa

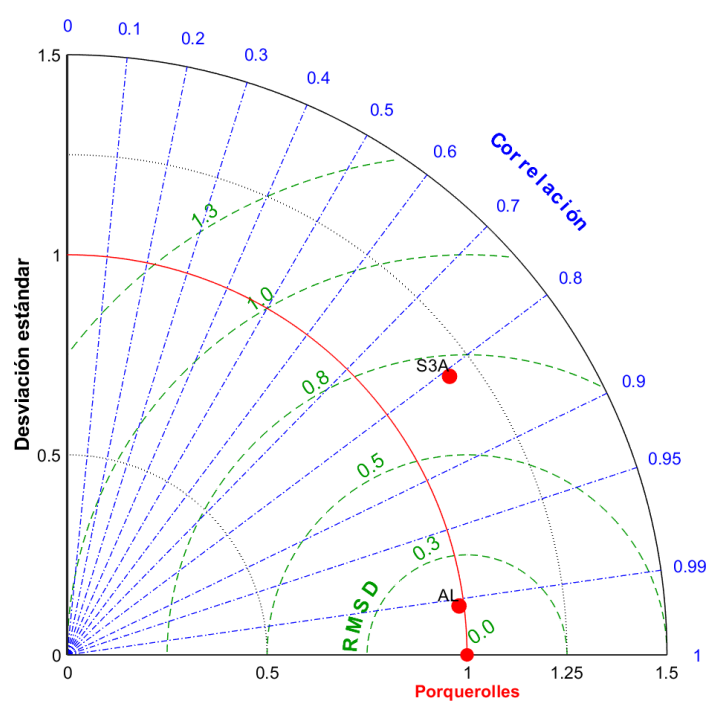




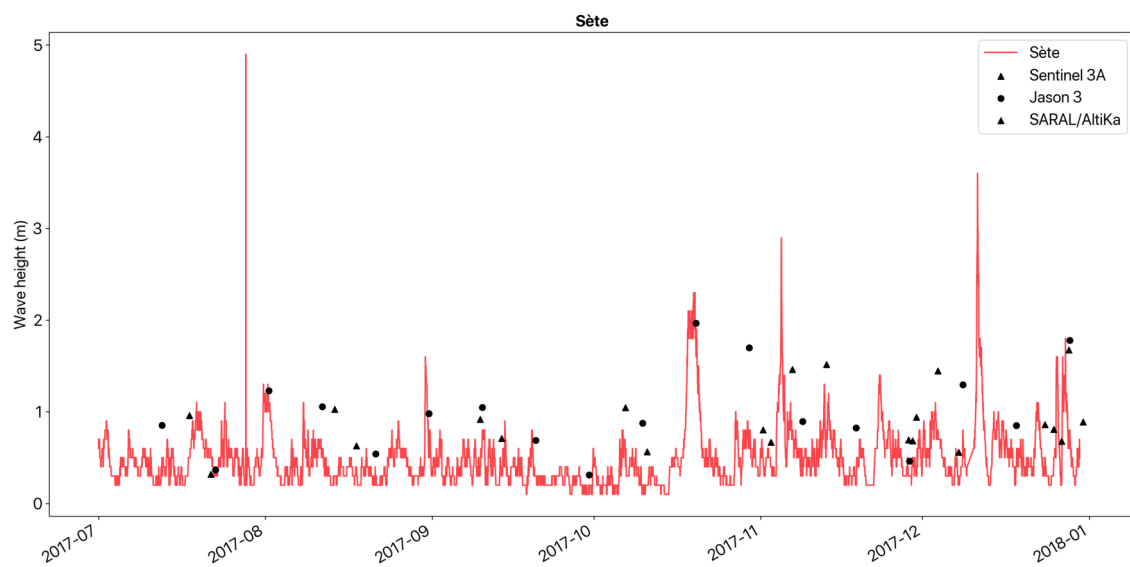
**Figura 7.9:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Maó y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



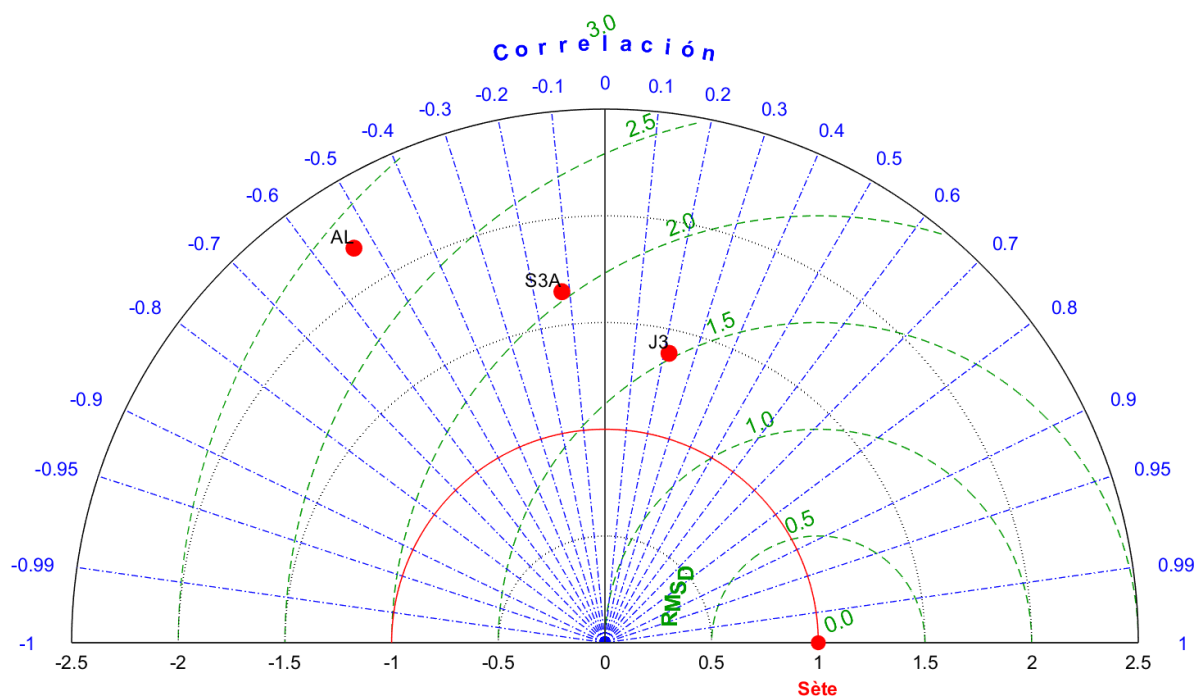
**Figura 7.10:** Serie temporal de la boya de Porquerolles con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa



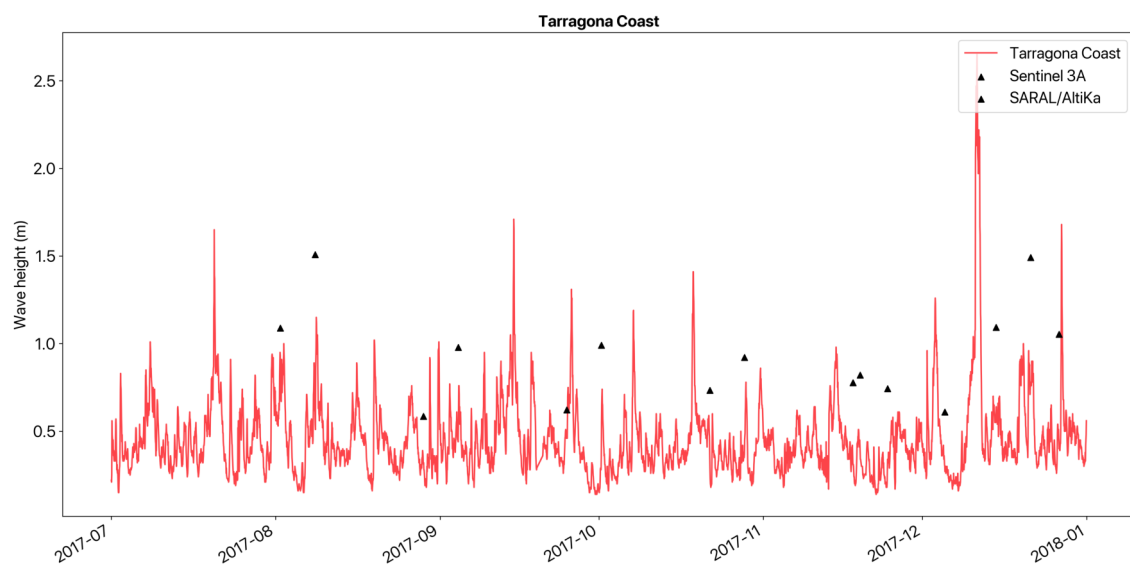
**Figura 7.11:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Porquerolles y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa



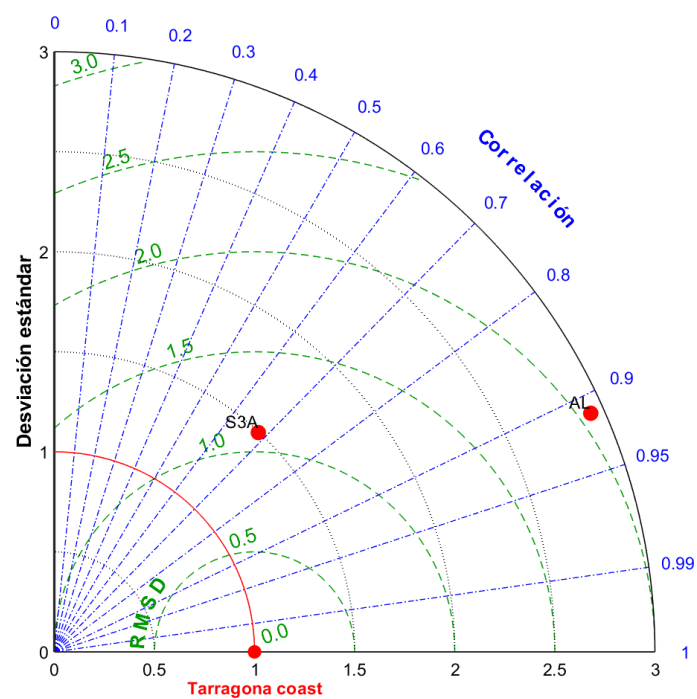
**Figura 7.12:** Serie temporal de la boya de Sète con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



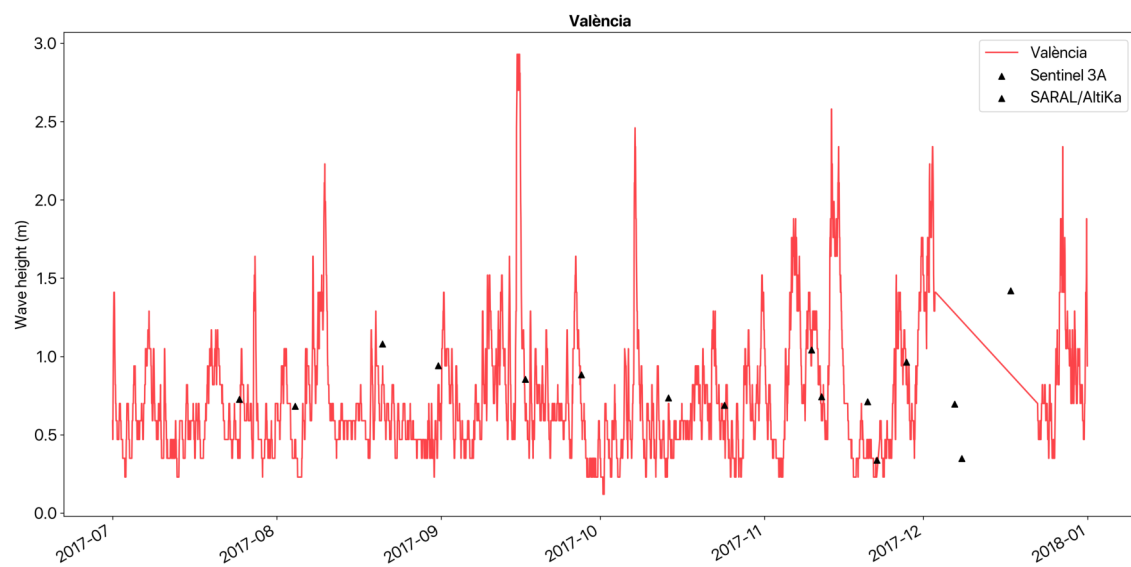
**Figura 7.13:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Sète y los satélites Sentinel 3A, Jason 3 y SARAL/AltiKa



**Figura 7.14:** Serie temporal de la boya costera de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa

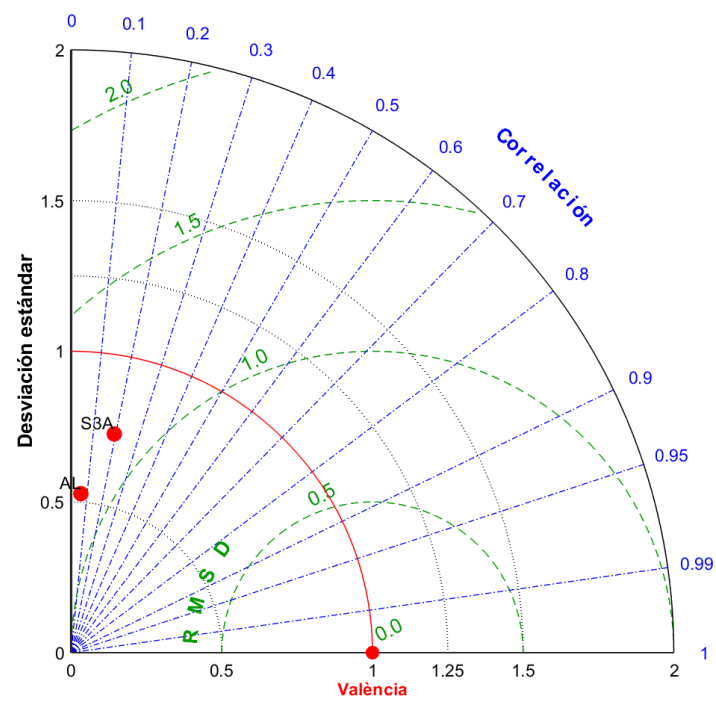


**Figura 7.15:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Tarragona y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa



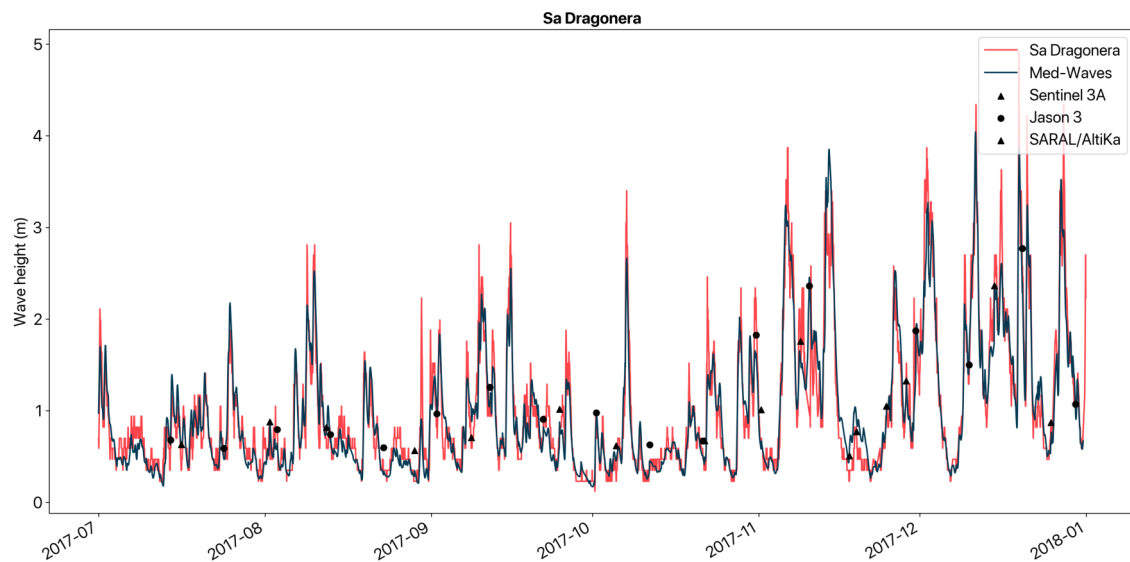
**Figura 7.16:** Serie temporal de la boya de València con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa



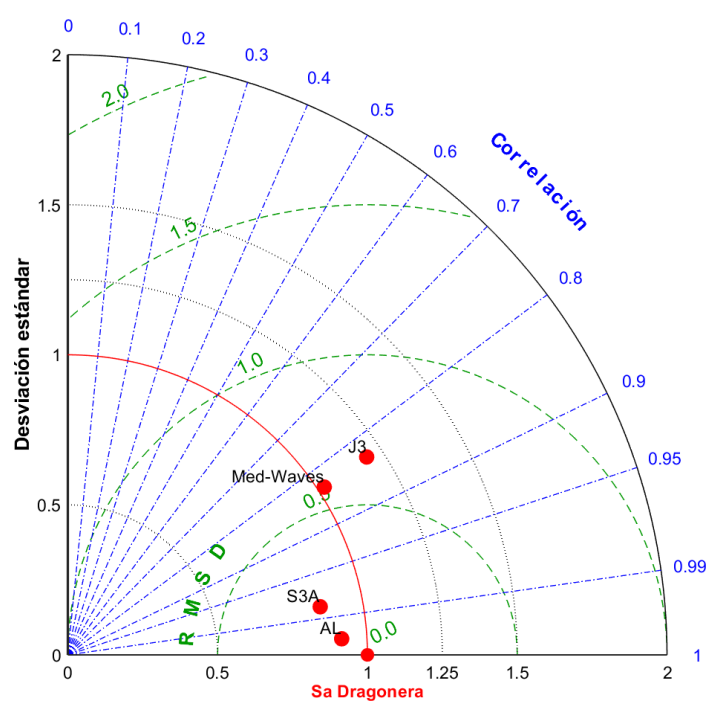


**Figura 7.17:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de València y los satélites Sentinel 3A y SARAL/AltiKa

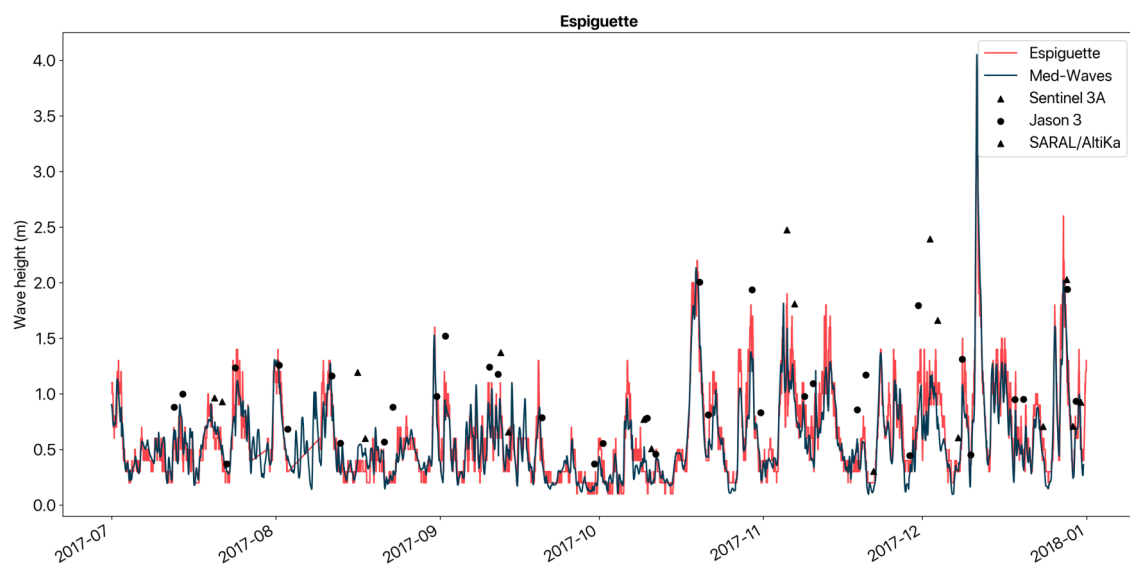
## Validación de las predicciones del modelo Med-Waves a partir de las medidas in situ y satélite



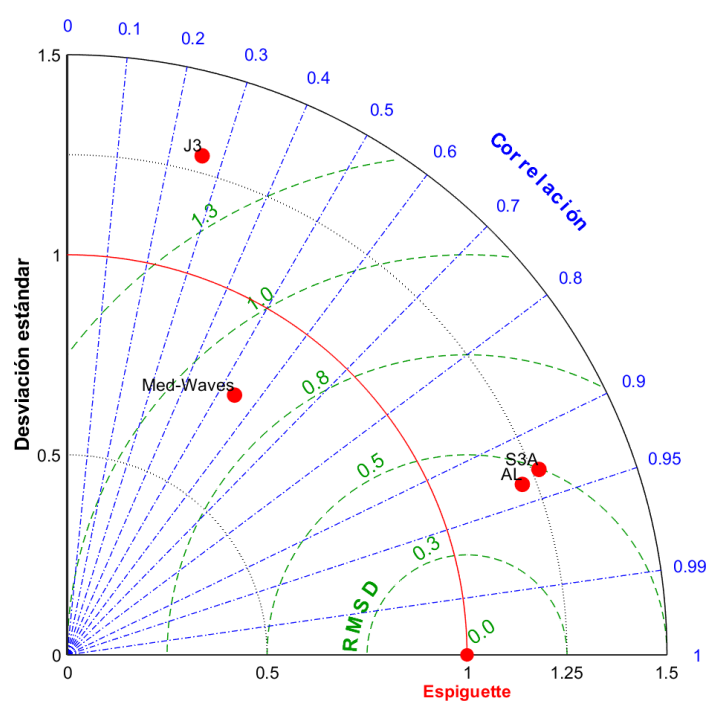
**Figura 7.18:** Serie temporal de la boya de Sa Dragonera con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



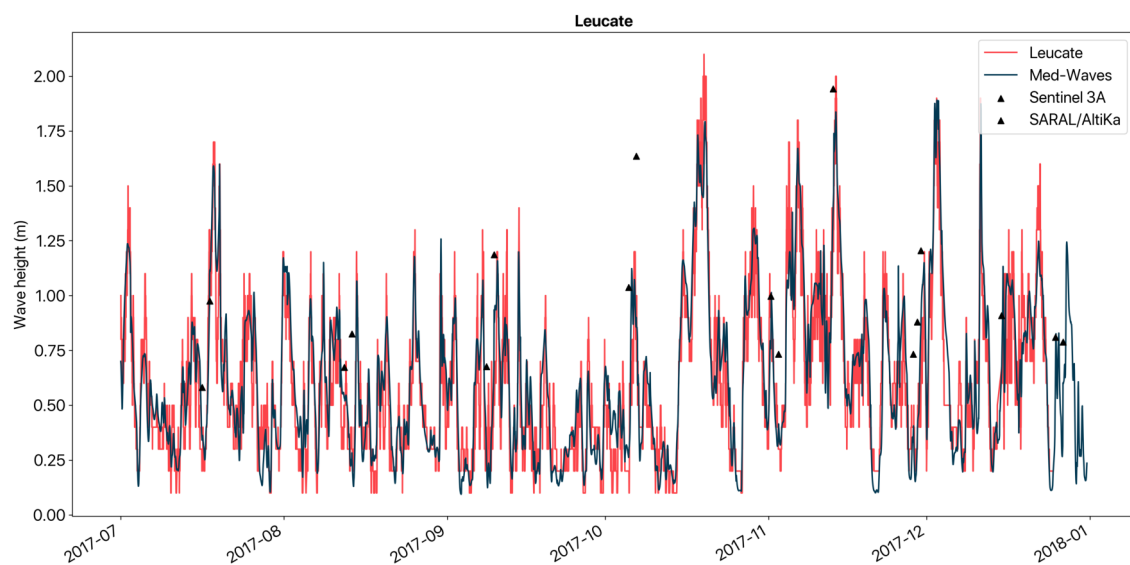
**Figura 7.19:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boyas de Sa Dragonera y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



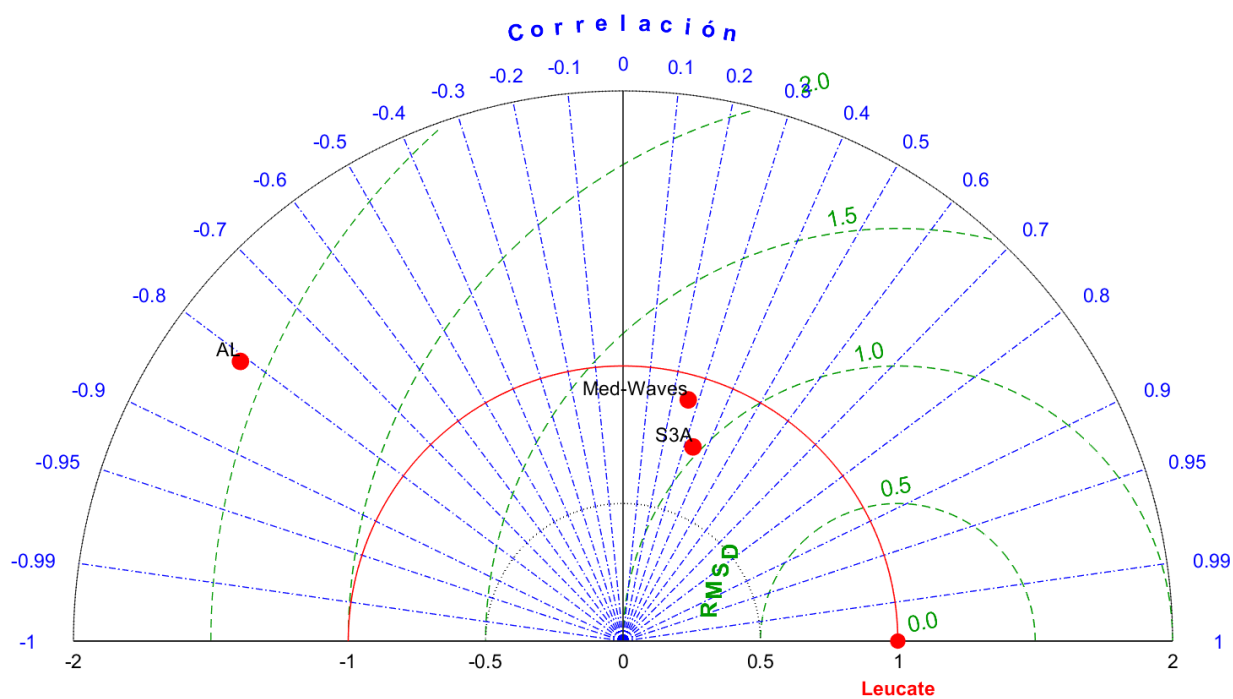
**Figura 7.20:** Serie temporal de la boya de Espiguette con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



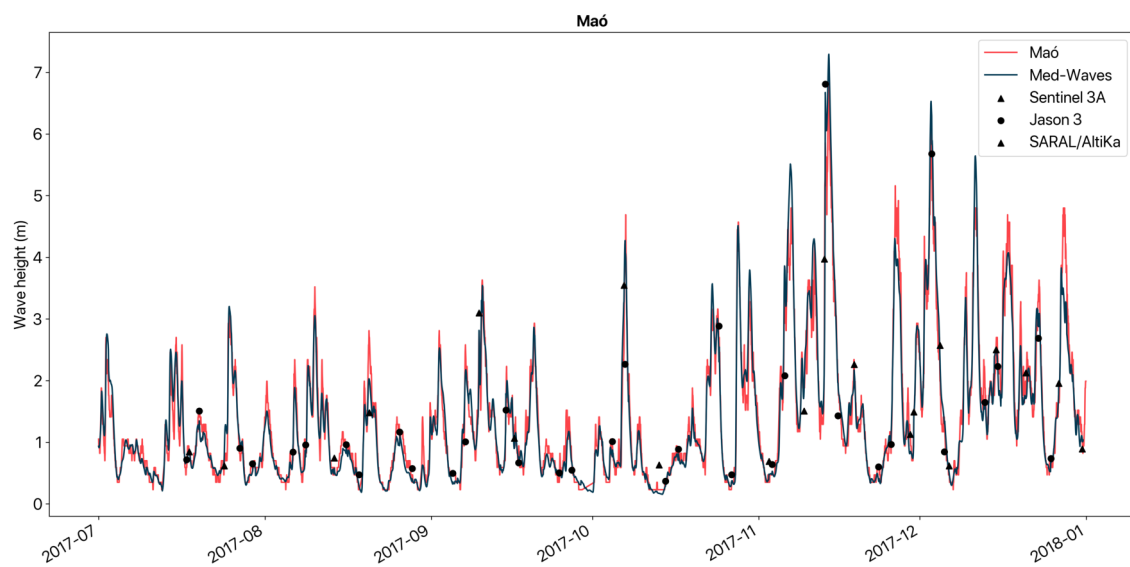
**Figura 7.21:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Espiguette y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



**Figura 7.22:** Serie temporal de la boya de Leucate con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves

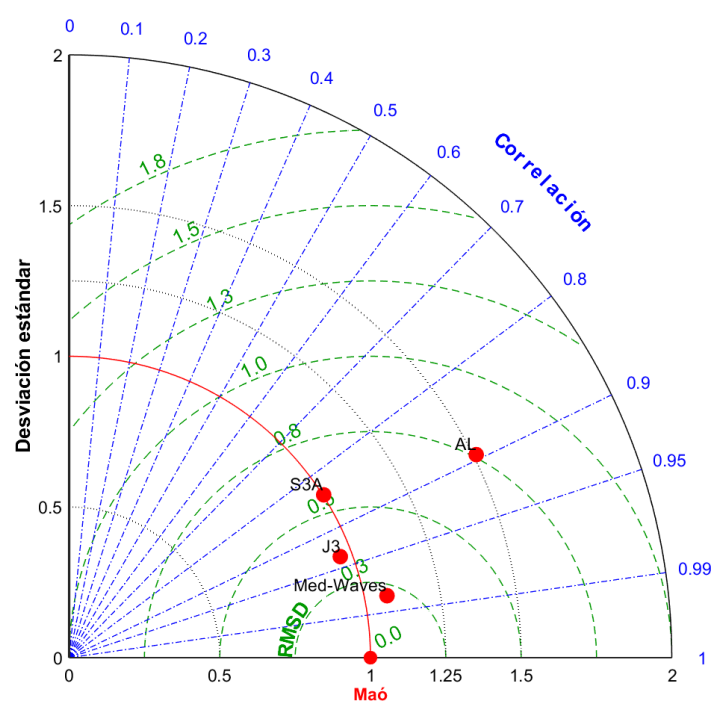


**Figura 7.23:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boyta de Leucate y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves

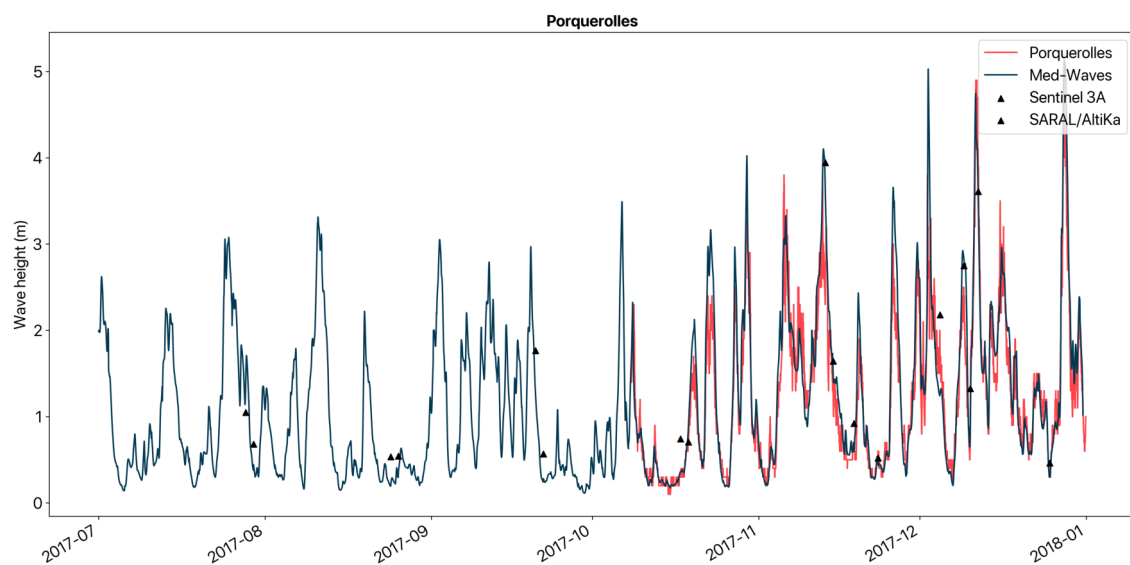


**Figura 7.24:** Serie temporal de la boya de Maó con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves

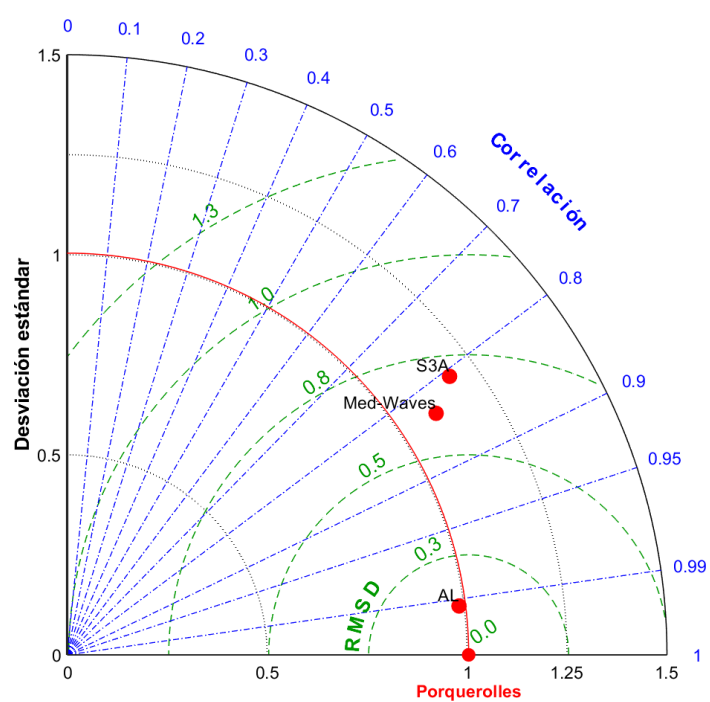




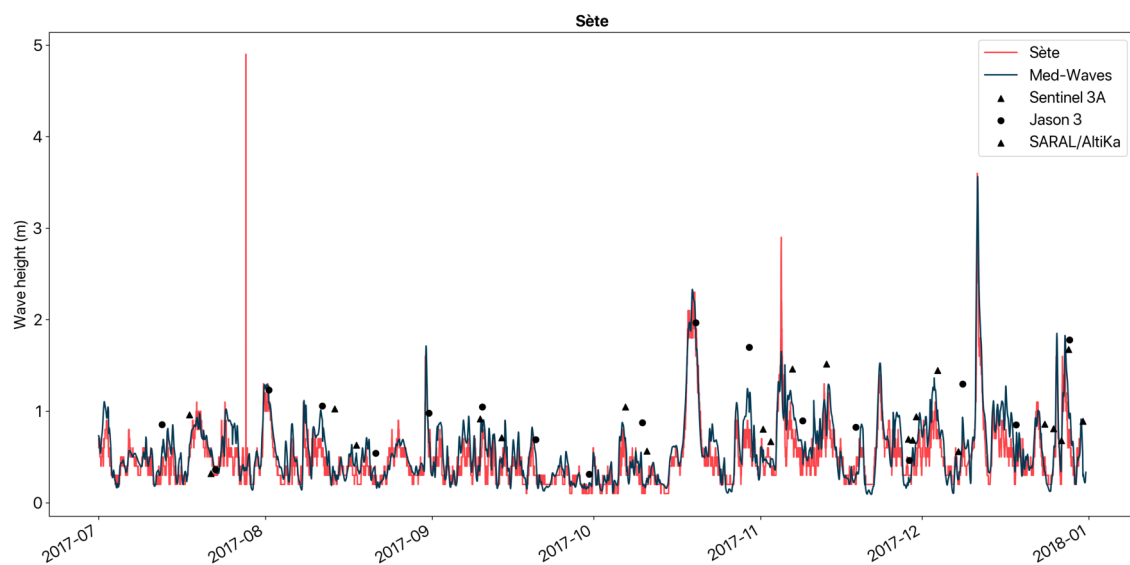
**Figura 7.25:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Maó y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



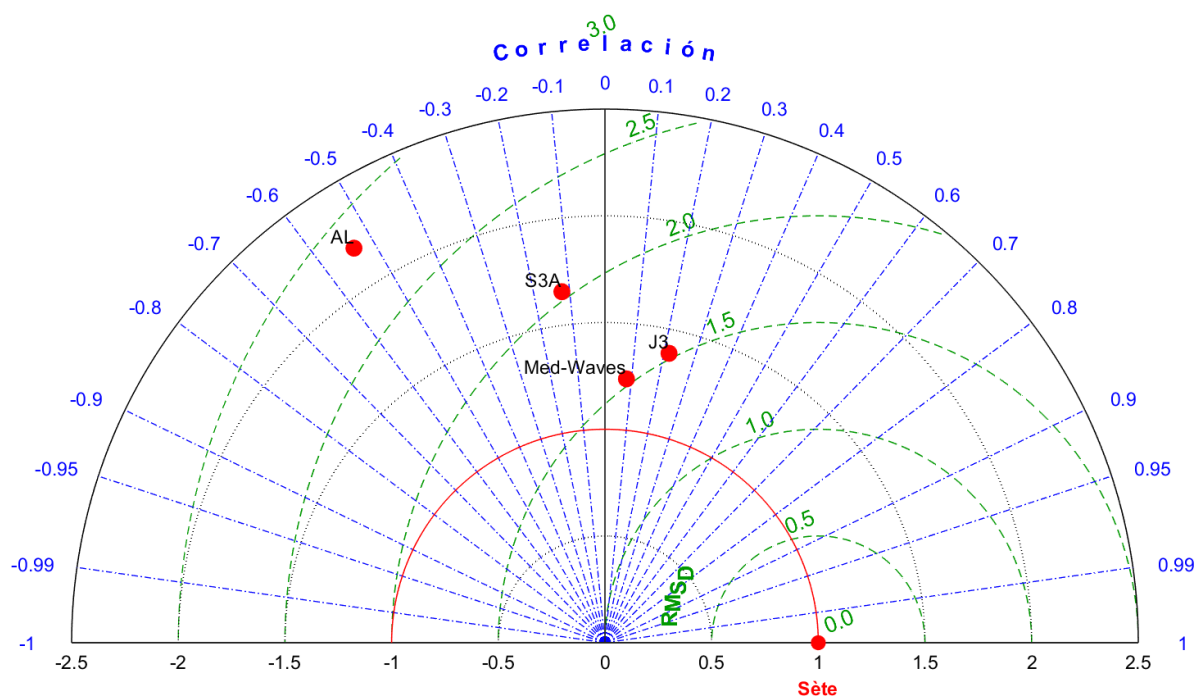
**Figura 7.26:** Serie temporal de la boya de Porquerolles con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



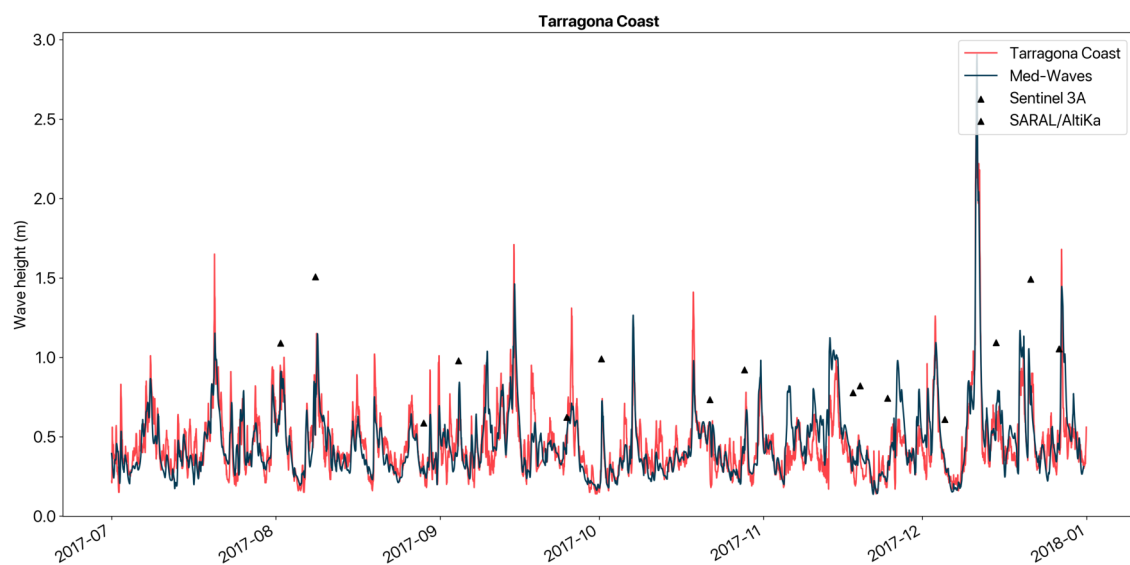
**Figura 7.27:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Porquerolles y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



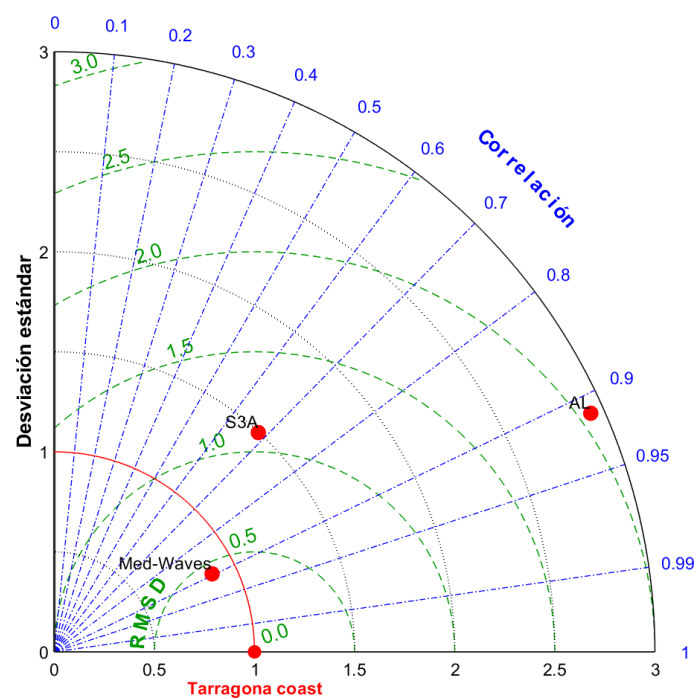
**Figura 7.28:** Serie temporal de la boya de Sète con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



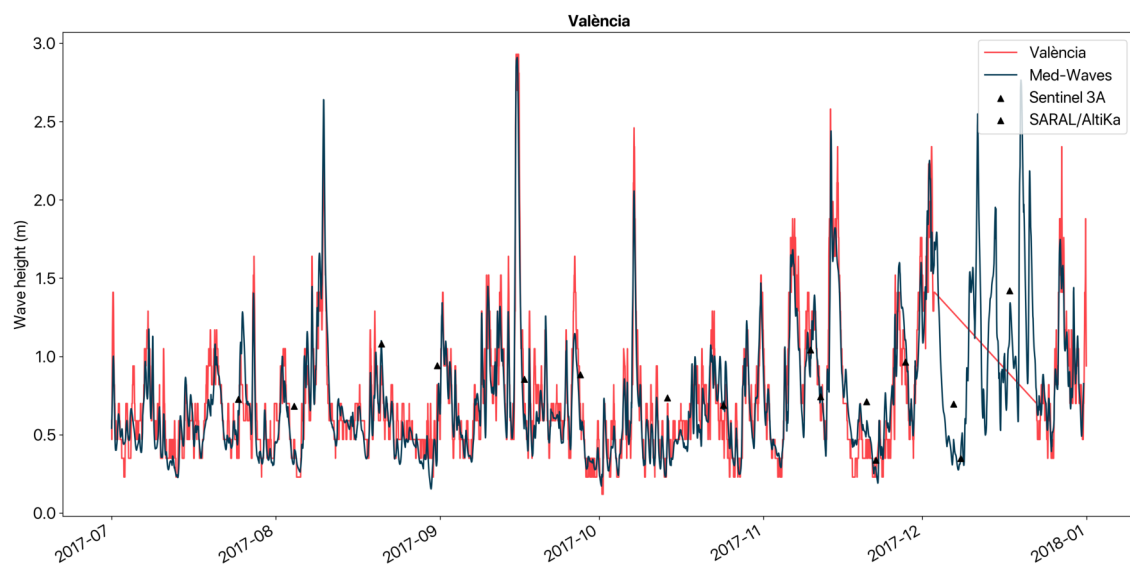
**Figura 7.29:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de Sète y los satélites Sentinel 3A, Jason 3, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



**Figura 7.30:** Serie temporal de la boya costera de Tarragona con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves

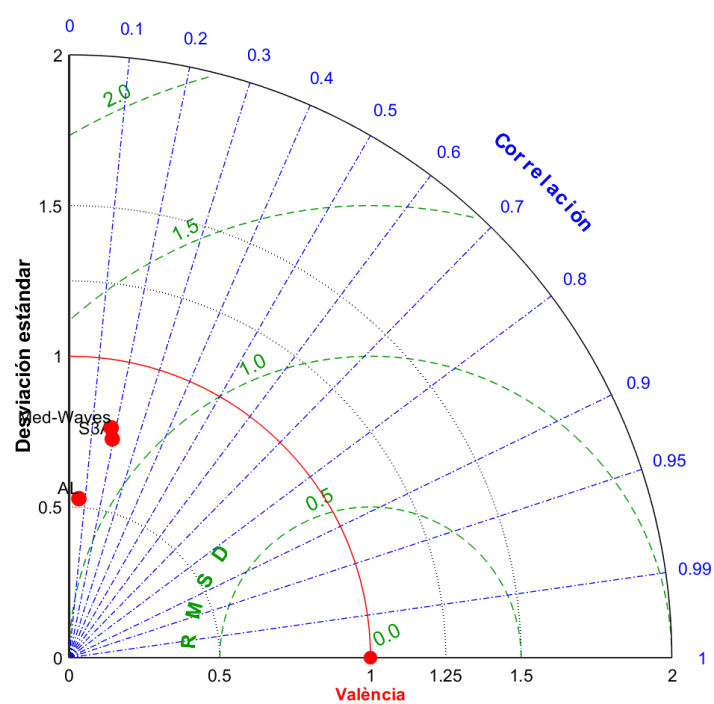


**Figura 7.31:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya costera de Tarragona y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves



**Figura 7.32:** Serie temporal de la boya de València con una dispersión de las observaciones de los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves

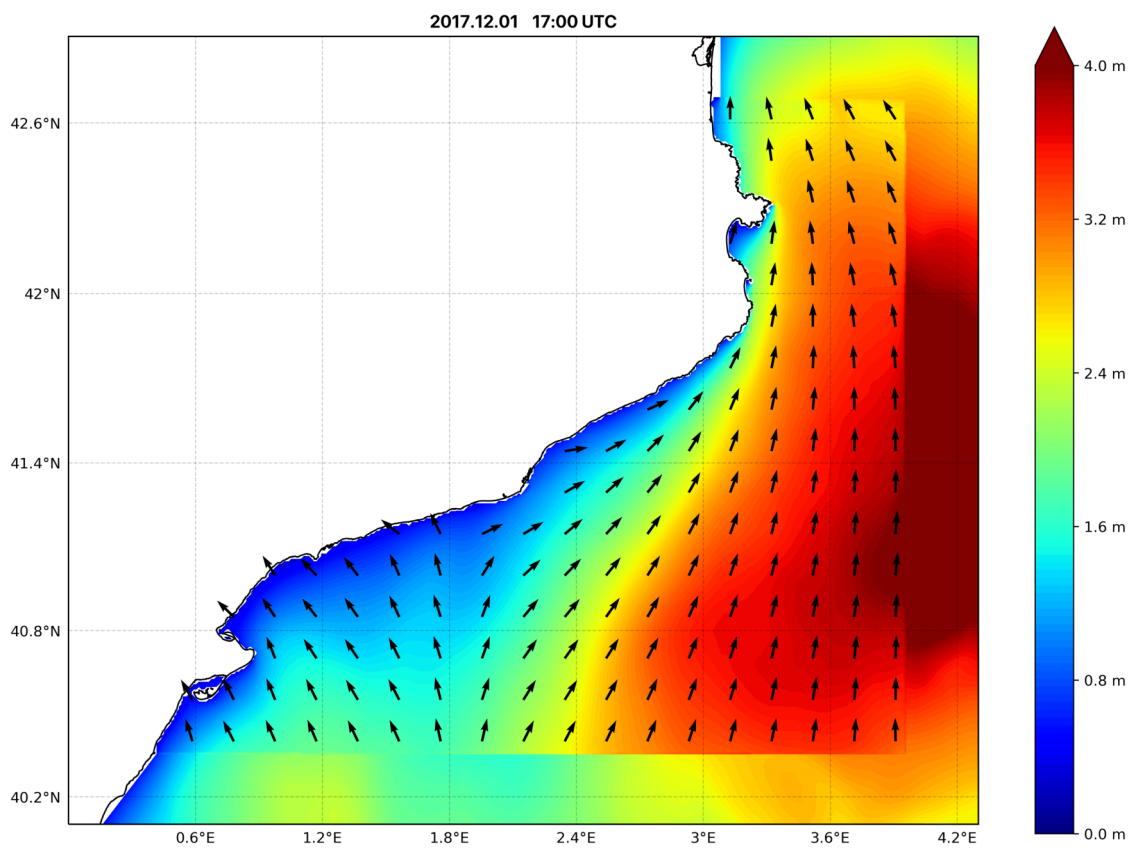




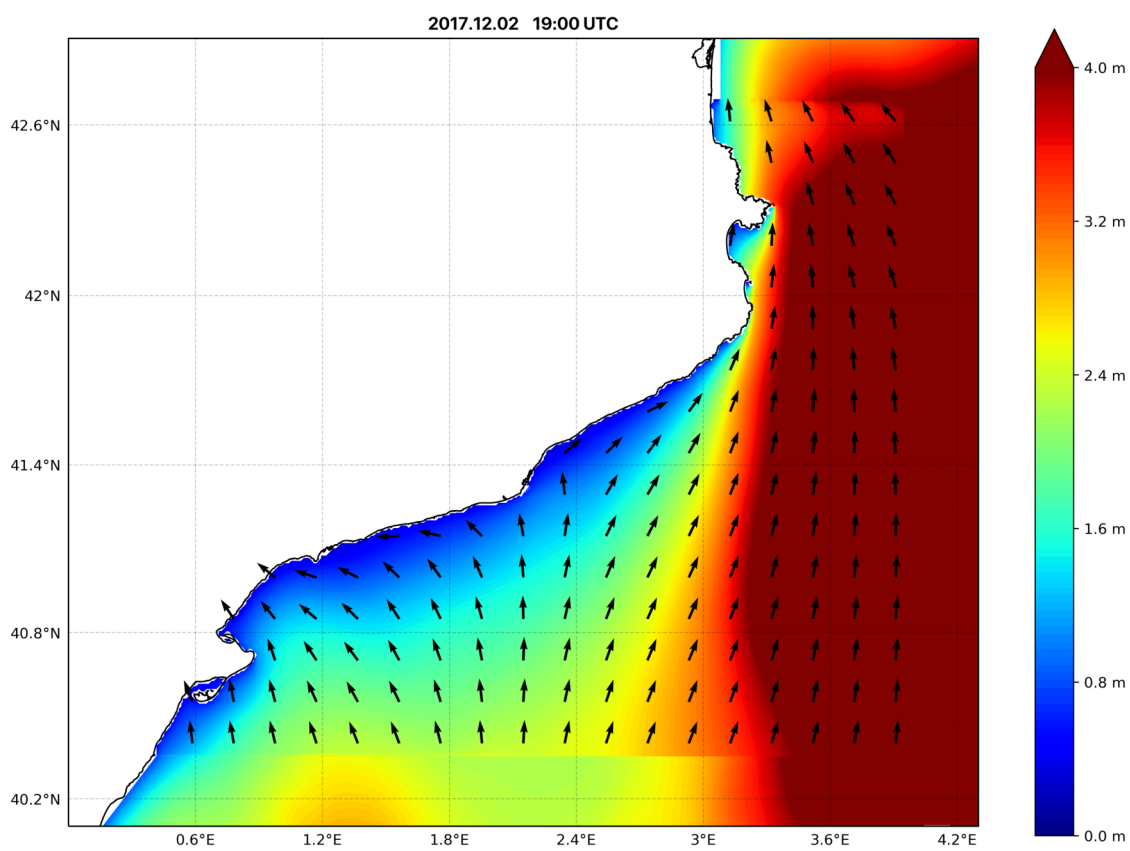
**Figura 7.33:** Diagrama de Taylor para la altura significativa de ola entre la boya de València y los satélites Sentinel 3A, SARAL/AltiKa y el modelo Med-Waves

## Mapas de altura de ola

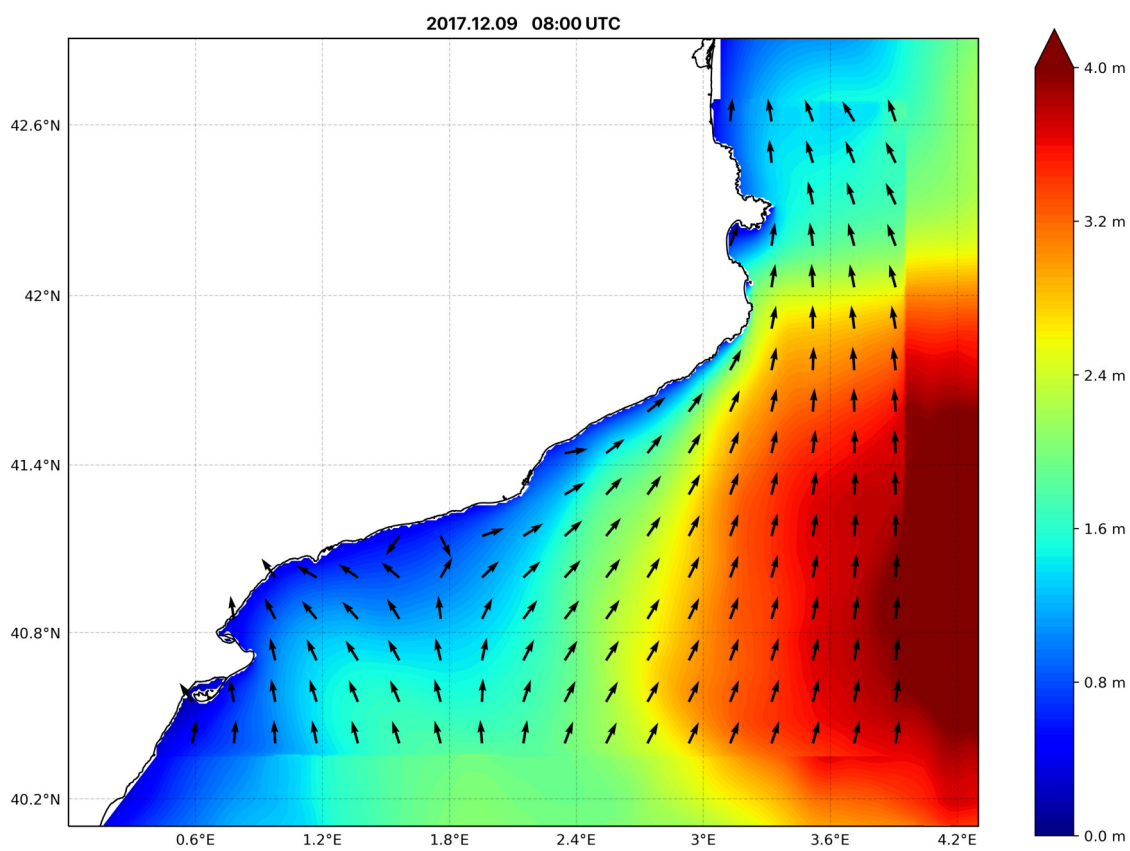
Se incluyen diversos mapas resultantes del modelo SWAN para eventos de Noviembre y Diciembre de 2017.



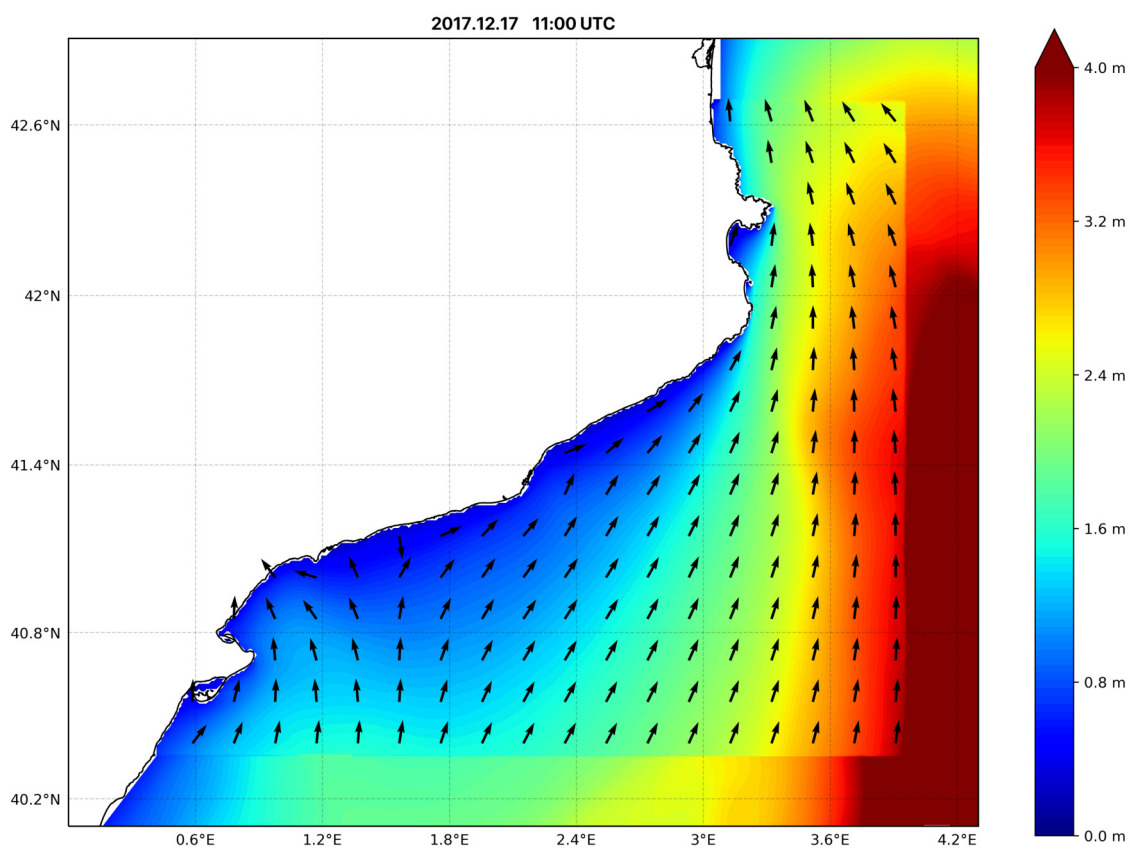
**Figura 7.34:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 17h del 1 de Diciembre de 2017



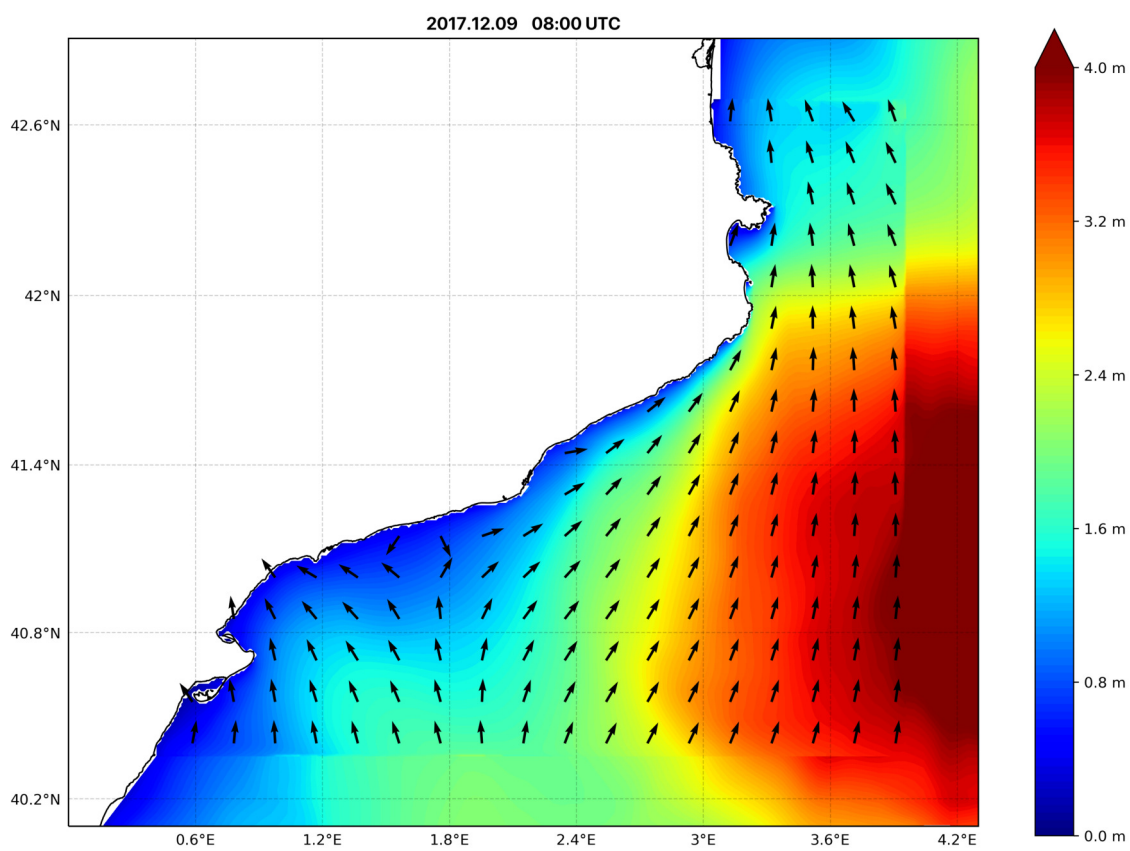
**Figura 7.35:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 19h del 2 de Diciembre de 2017



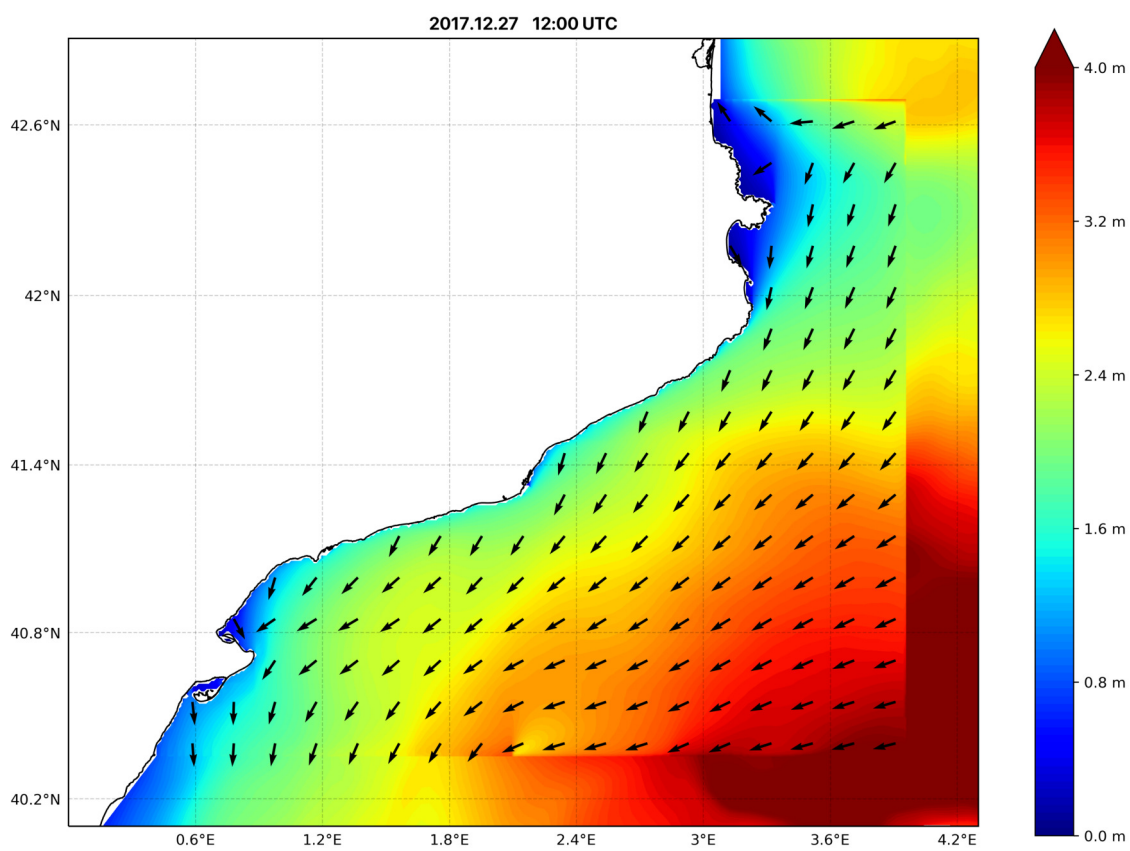
**Figura 7.36:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 08h del 9 de Diciembre de 2017



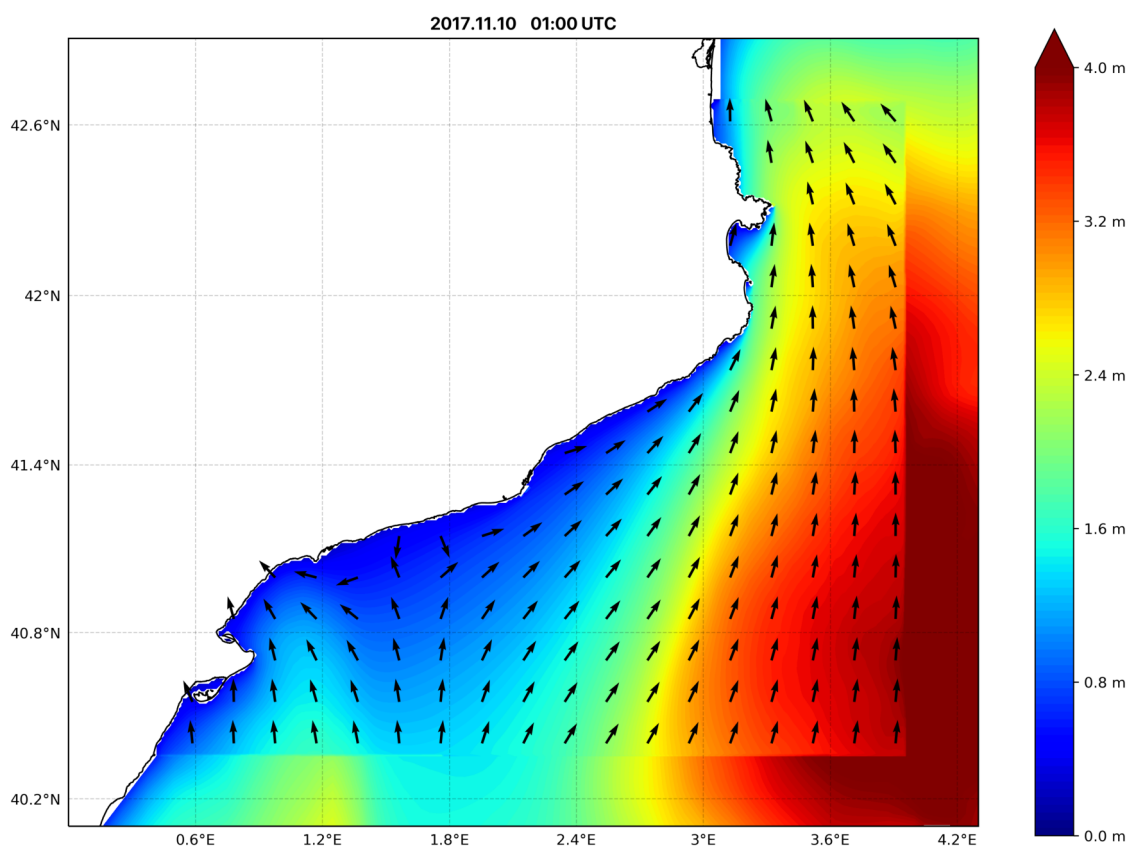
**Figura 7.37:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 11h del 17 de Diciembre de 2017



**Figura 7.38:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 03h del 19 de Diciembre de 2017

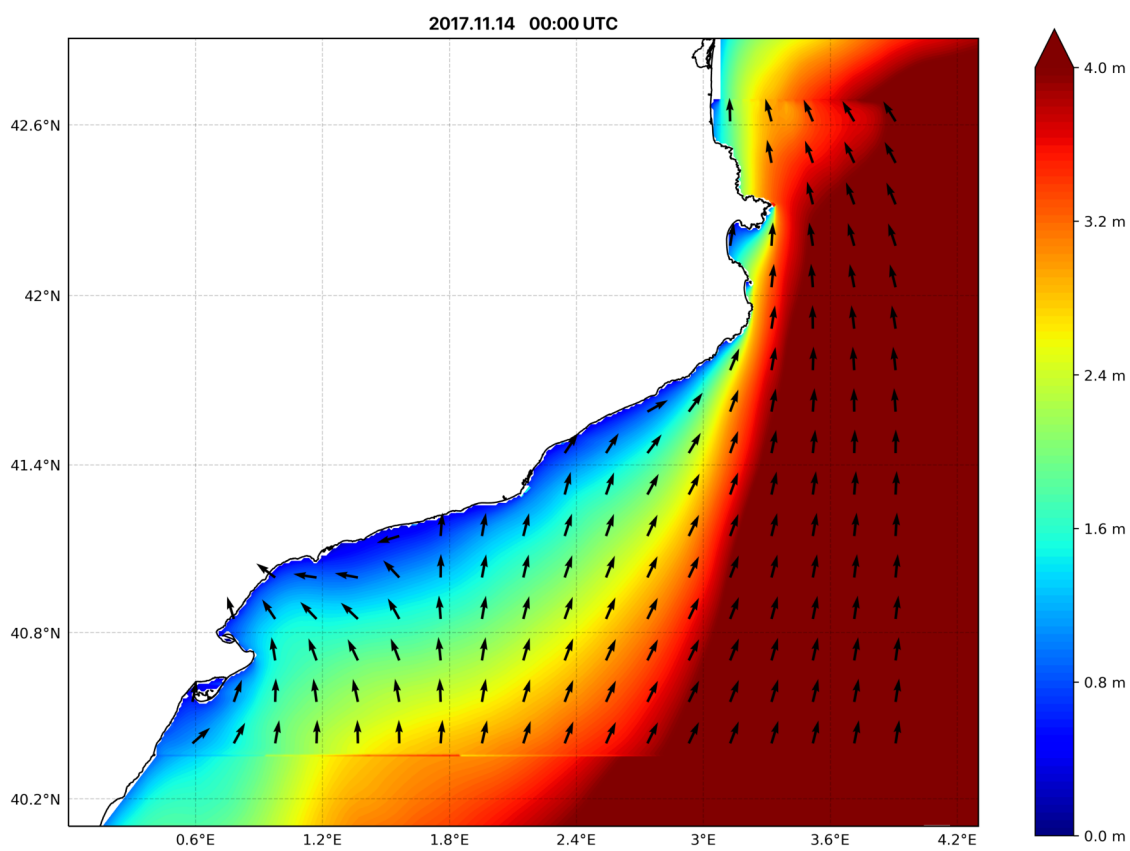


**Figura 7.39:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 12h del 27 de Diciembre de 2017

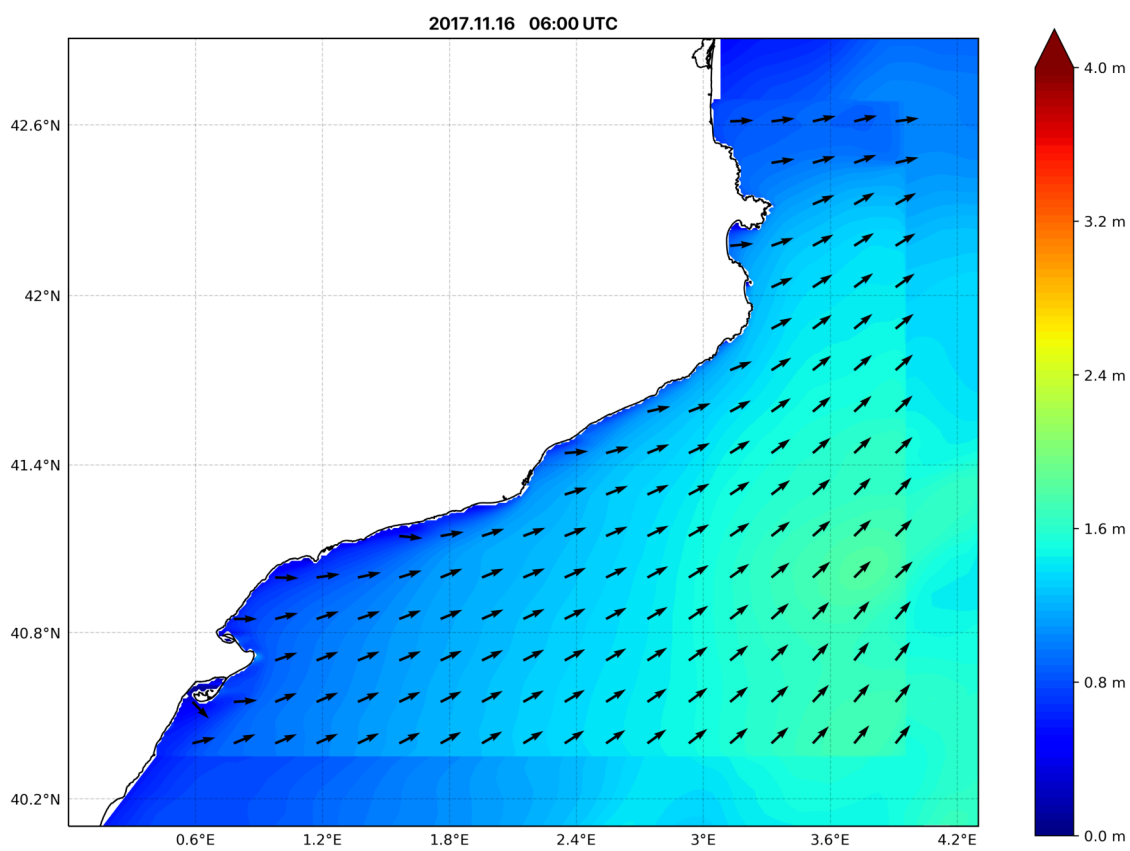


**Figura 7.40:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 01h del 10 de Noviembre de 2017

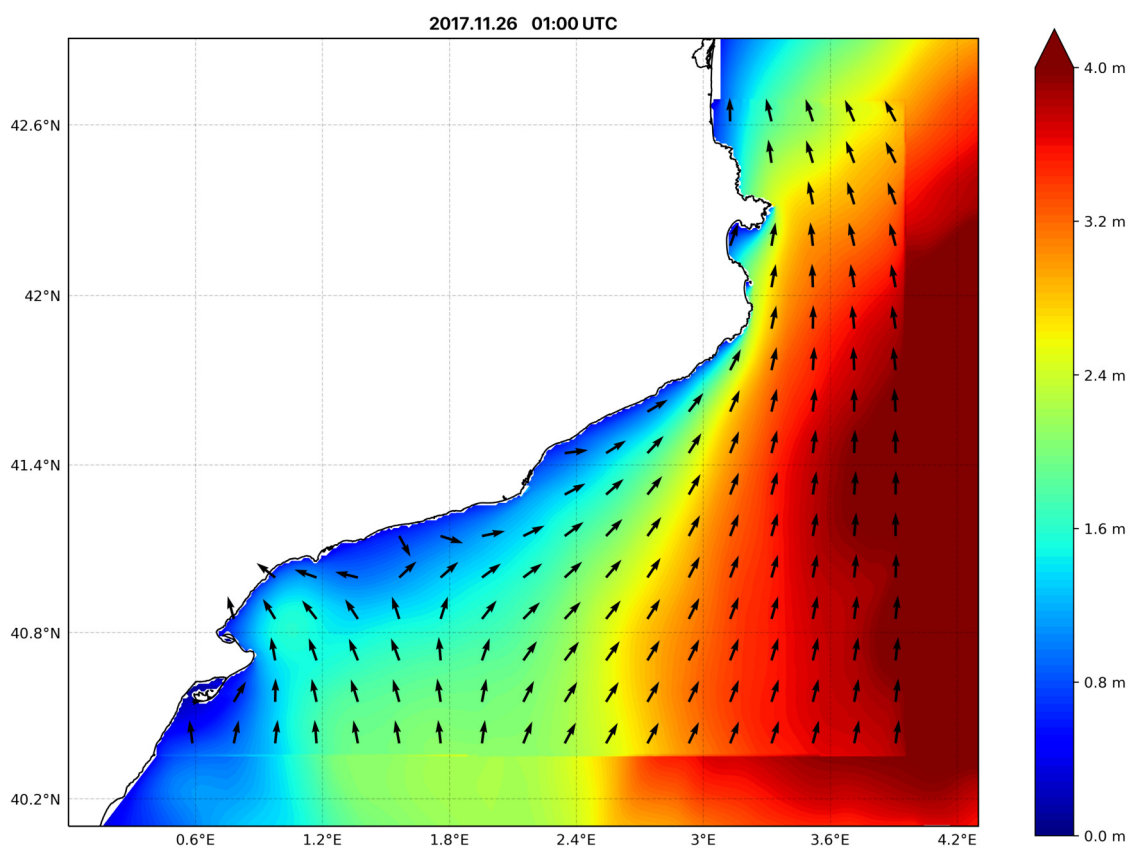




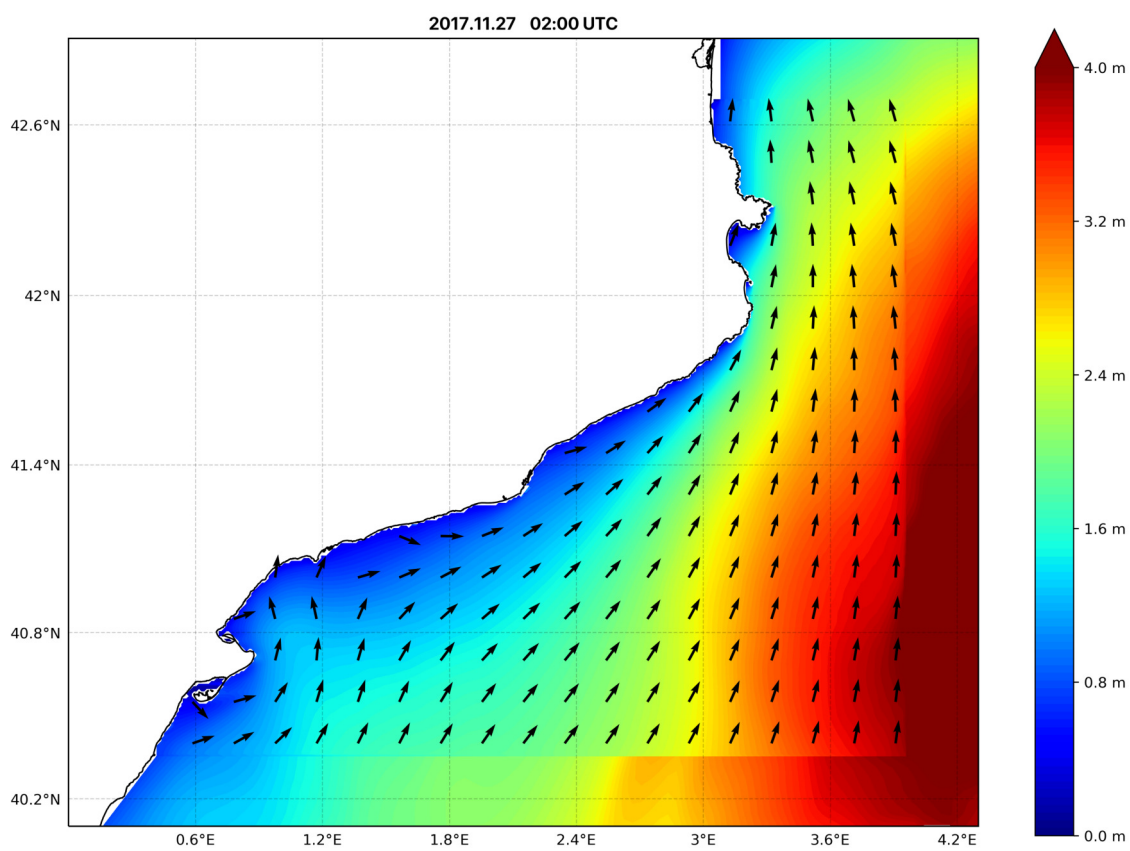
**Figura 7.41:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 00h del 14 de Noviembre de 2017



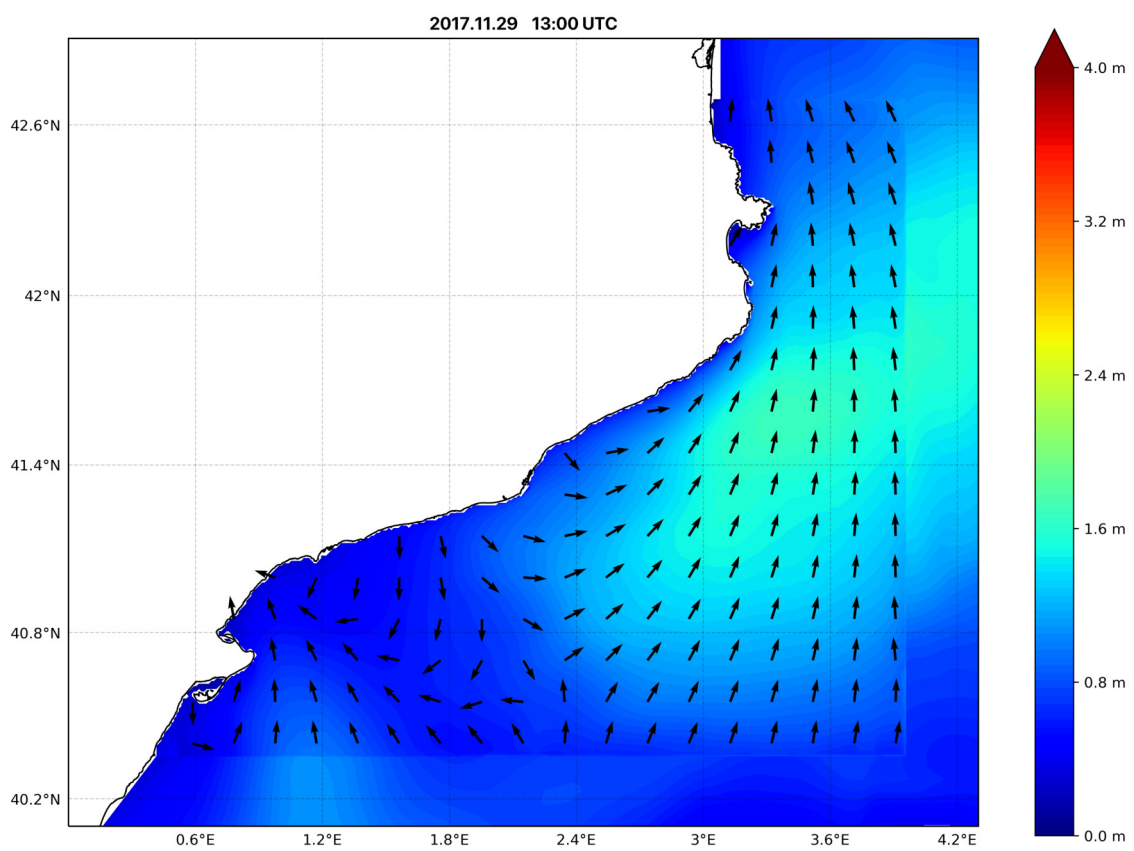
**Figura 7.42:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 06h del 16 de Noviembre de 2017



**Figura 7.43:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 01h del 26 de Noviembre de 2017



**Figura 7.44:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 02h del 27 de Noviembre de 2017



**Figura 7.45:** Mapa de predicción de altura de ola del modelo SWAN a las 13h del 29 de Noviembre de 2017



# Anejo de modelado

Como ejemplo, se incluye un par de archivos de entrada del modelo SWAN (\*.swn) utilizados en el trabajo, donde se pueden observar detalles del modelo como la cantidad de puntos utilizados, los procedimientos activados y la anidación entre resultados de simulaciones sucesivas.

Para el modelo de este trabajo, debido al número de archivos de entrada de datos en los contornos, ha sido necesario modificar aspectos del archivo *swaninit*, resultando como sigue:

```

      4      version of initialisation file
UPC      name of institute
      3      command file ref. number
INPUT    command file name
      4      print file ref. number
PRINT    print file name
      4      test file ref. number
          test file name

      6      screen ref. number
999999   highest file ref. number
$        comment identifier
          TAB character
\        dir sep char in input file
/        dir sep char replacing previous one
      1      default time coding option
100      speed of processor    1
100      speed of processor    2
```

## Archivo para el mes de Julio de 2017

PROJ 'Costa Catalana' 'Cat'

SET NAUTICAL

MODE NONSTATIONARY

COORDINATES SPHERICAL CCM

! Malla

computacional\_-----

CGRID REG 0.41666722 40.354168 0. 3.5416667 2.333332 300 259

CIRcle 36 0.01 1

! Input -

Batimetria\_-----

INPGRID BOTTOM REG 0.061279296875 39.950927197933176 0.00 1930

1539 0.00208333333333 0.00208333333333

READINP BOTTOM 1. './Batimetria/EMODNET\_Cat.dat' 1 0 FREE

! Input -

Vent\_-----

INPGRID WIND REGULAR -5.5 34.5 0. 225 105 0.1 0.1 \_

NONSTATIONARY 20170701.000000 1 HR 20170801.000000

READINP WIND 1 SERIES './Vent/072017.txt' 3 0 0 0 FREE

! Input -

Prediccio\_-----

BOUND SHAP JON 3.3 PEAK DSPR DEGR

! Nord

BOUND SEGM XY 3.083334 42.6875 3.104167342185974 42.6875 VAR

FILE 0. './Prediccio/N-3.083.txt' 1

BOUND SEGM XY 3.104167342185974 42.6875 3.145833969116211

42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.125.txt' 1



BOUND SEGM XY 3.145833969116211 42.6875 3.1875005960464478  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.167.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.1875005960464478 42.6875 3.229167342185974  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.208.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.229167342185974 42.6875 3.270833969116211  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.250.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.270833969116211 42.6875 3.3125005960464478  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.292.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.3125005960464478 42.6875 3.354167342185974  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.333.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.354167342185974 42.6875 3.395833969116211  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.375.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.395833969116211 42.6875 3.4375005960464478  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.417.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.4375005960464478 42.6875 3.479167342185974  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.458.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.479167342185974 42.6875 3.520833969116211  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.500.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.520833969116211 42.6875 3.5625005960464478  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.542.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.5625005960464478 42.6875 3.604167342185974  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.583.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.604167342185974 42.6875 3.645833969116211  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.625.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.645833969116211 42.6875 3.6875005960464478  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.667.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.6875005960464478 42.6875 3.729167342185974  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.708.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.729167342185974 42.6875 3.770833969116211  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.750.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.770833969116211 42.6875 3.8125005960464478  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.792.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.8125005960464478 42.6875 3.854167342185974  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.833.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.854167342185974 42.6875 3.895833969116211  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.875.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.895833969116211 42.6875 3.9375005960464478  
 42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.917.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.9375005960464478 42.6875 3.958334 42.6875 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/N-3.958.txt' 1

```

! Est
BOUND SEGM XY 3.958334 40.354168 3.958334 40.375 VAR FILE 0. './
    Prediccio/E-40.354.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.375 3.958334 40.41666603088379 VAR
    FILE 0. './Prediccio/E-40.396.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.41666603088379 3.958334
    40.45833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.438.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.45833396911621 3.958334 40.5 VAR FILE
    0. './Prediccio/E-40.479.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.5 3.958334 40.54166603088379 VAR FILE
    0. './Prediccio/E-40.521.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.54166603088379 3.958334
    40.58333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.562.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.58333396911621 3.958334 40.625 VAR
    FILE 0. './Prediccio/E-40.604.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.625 3.958334 40.66666603088379 VAR
    FILE 0. './Prediccio/E-40.646.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.66666603088379 3.958334
    40.70833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.688.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.70833396911621 3.958334 40.75 VAR FILE
    0. './Prediccio/E-40.729.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.75 3.958334 40.79166603088379 VAR FILE
    0. './Prediccio/E-40.771.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.79166603088379 3.958334
    40.83333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.812.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.83333396911621 3.958334 40.875 VAR
    FILE 0. './Prediccio/E-40.854.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.875 3.958334 40.91666603088379 VAR
    FILE 0. './Prediccio/E-40.896.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.91666603088379 3.958334
    40.95833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.938.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.95833396911621 3.958334 41.0 VAR FILE
    0. './Prediccio/E-40.979.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.0 3.958334 41.04166603088379 VAR FILE
    0. './Prediccio/E-41.021.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.04166603088379 3.958334
    41.08333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.062.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.08333396911621 3.958334 41.125 VAR
    FILE 0. './Prediccio/E-41.104.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.125 3.958334 41.16666603088379 VAR
    FILE 0. './Prediccio/E-41.146.txt' 1

```

BOUND SEGM XY 3.958334 41.16666603088379 3.958334  
 41.20833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.188.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.20833396911621 3.958334 41.25 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-41.229.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.25 3.958334 41.29166603088379 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-41.271.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.29166603088379 3.958334  
 41.33333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.312.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.33333396911621 3.958334 41.375 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-41.354.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.375 3.958334 41.41666603088379 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-41.396.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.41666603088379 3.958334  
 41.45833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.438.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.45833396911621 3.958334 41.5 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-41.479.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.5 3.958334 41.54166603088379 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-41.521.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.54166603088379 3.958334  
 41.58333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.562.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.58333396911621 3.958334 41.625 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-41.604.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.625 3.958334 41.66666603088379 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-41.646.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.66666603088379 3.958334  
 41.70833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.688.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.70833396911621 3.958334 41.75 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-41.729.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.75 3.958334 41.79166603088379 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-41.771.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.79166603088379 3.958334  
 41.83333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.812.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.83333396911621 3.958334 41.875 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-41.854.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.875 3.958334 41.91666603088379 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-41.896.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.91666603088379 3.958334  
 41.95833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.938.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 41.95833396911621 3.958334 42.0 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-41.979.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.0 3.958334 42.04166603088379 VAR FILE

```

0. './Prediccio/E-42.021.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.04166603088379 3.958334
42.08333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.062.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.08333396911621 3.958334 42.125 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-42.104.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.125 3.958334 42.16666603088379 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-42.146.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.16666603088379 3.958334
42.20833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.188.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.20833396911621 3.958334 42.25 VAR FILE
0. './Prediccio/E-42.229.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.25 3.958334 42.29166603088379 VAR FILE
0. './Prediccio/E-42.271.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.29166603088379 3.958334
42.33333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.312.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.33333396911621 3.958334 42.375 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-42.354.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.375 3.958334 42.41666603088379 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-42.396.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.41666603088379 3.958334
42.45833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.438.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.45833396911621 3.958334 42.5 VAR FILE
0. './Prediccio/E-42.479.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.5 3.958334 42.54166603088379 VAR FILE
0. './Prediccio/E-42.521.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.54166603088379 3.958334
42.58333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.562.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.58333396911621 3.958334 42.625 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-42.604.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.625 3.958334 42.66666603088379 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-42.646.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 42.66666603088379 3.958334 42.6875 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-42.688.txt' 1

```

! Sud

```

BOUND SEGM XY 0.41666722 40.354168 0.4375005513429642 40.354168
VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.417.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.4375005513429642 40.354168 0.4791672080755234
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.458.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.4791672080755234 40.354168 0.5208338797092438
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.500.txt' 1

```

BOUND SEGM XY 0.5208338797092438 40.354168 0.5625005662441254  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.542.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.5625005662441254 40.354168 0.6041672229766846  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.583.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.6041672229766846 40.354168 0.6458338797092438  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.625.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.6458338797092438 40.354168 0.6875005662441254  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.667.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.6875005662441254 40.354168 0.7291672229766846  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.708.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.7291672229766846 40.354168 0.7708338797092438  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.750.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.7708338797092438 40.354168 0.8125005662441254  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.792.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.8125005662441254 40.354168 0.854167252779007  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.833.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.854167252779007 40.354168 0.8958339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.875.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.8958339095115662 40.354168 0.9375005662441254  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.917.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.9375005662441254 40.354168 0.979167252779007  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.958.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.979167252779007 40.354168 1.0208339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.000.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.0208339095115662 40.354168 1.062500536441803  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.042.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.062500536441803 40.354168 1.1041672229766846  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.083.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.1041672229766846 40.354168 1.1458339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.125.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.1458339095115662 40.354168 1.1875005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.167.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.1875005960464478 40.354168 1.2291672825813293  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.208.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.2291672825813293 40.354168 1.2708339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.250.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.2708339095115662 40.354168 1.3125005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.292.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.3125005960464478 40.354168 1.3541672825813293  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.333.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.3541672825813293 40.354168 1.3958339095115662

```

40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.375.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.3958339095115662 40.354168 1.4375005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.417.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.4375005960464478 40.354168 1.4791672825813293
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.458.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.4791672825813293 40.354168 1.5208339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.500.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.5208339095115662 40.354168 1.5625005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.542.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.5625005960464478 40.354168 1.6041672825813293
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.583.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.6041672825813293 40.354168 1.6458339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.625.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.6458339095115662 40.354168 1.6875005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.667.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.6875005960464478 40.354168 1.7291672825813293
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.708.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.7291672825813293 40.354168 1.7708339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.750.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.7708339095115662 40.354168 1.8125005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.792.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.8125005960464478 40.354168 1.8541672825813293
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.833.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.8541672825813293 40.354168 1.8958339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.875.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.8958339095115662 40.354168 1.9375005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.917.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.9375005960464478 40.354168 1.9791673421859741
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.958.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.9791673421859741 40.354168 2.020833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.000.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.020833969116211 40.354168 2.0625005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.042.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.0625005960464478 40.354168 2.104167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.083.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.104167342185974 40.354168 2.145833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.125.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.145833969116211 40.354168 2.1875005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.167.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.1875005960464478 40.354168 2.229167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.208.txt' 1

```



BOUND SEGM XY 2.229167342185974 40.354168 2.270833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.250.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.270833969116211 40.354168 2.3125005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.292.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.3125005960464478 40.354168 2.354167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.333.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.354167342185974 40.354168 2.395833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.375.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.395833969116211 40.354168 2.4375005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.417.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.4375005960464478 40.354168 2.479167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.458.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.479167342185974 40.354168 2.520833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.500.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.520833969116211 40.354168 2.5625005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.542.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.5625005960464478 40.354168 2.604167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.583.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.604167342185974 40.354168 2.645833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.625.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.645833969116211 40.354168 2.6875005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.667.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.6875005960464478 40.354168 2.729167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.708.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.729167342185974 40.354168 2.770833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.750.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.770833969116211 40.354168 2.8125005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.792.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.8125005960464478 40.354168 2.854167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.833.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.854167342185974 40.354168 2.895833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.875.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.895833969116211 40.354168 2.9375005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.917.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.9375005960464478 40.354168 2.979167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.958.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.979167342185974 40.354168 3.020833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.000.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.020833969116211 40.354168 3.0625005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.042.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.0625005960464478 40.354168 3.104167342185974

```

40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.083.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.104167342185974 40.354168 3.145833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.125.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.145833969116211 40.354168 3.1875005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.167.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.1875005960464478 40.354168 3.229167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.208.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.229167342185974 40.354168 3.270833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.250.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.270833969116211 40.354168 3.3125005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.292.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.3125005960464478 40.354168 3.354167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.333.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.354167342185974 40.354168 3.395833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.375.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.395833969116211 40.354168 3.4375005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.417.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.4375005960464478 40.354168 3.479167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.458.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.479167342185974 40.354168 3.520833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.500.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.520833969116211 40.354168 3.5625005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.542.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.5625005960464478 40.354168 3.604167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.583.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.604167342185974 40.354168 3.645833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.625.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.645833969116211 40.354168 3.6875005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.667.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.6875005960464478 40.354168 3.729167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.708.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.729167342185974 40.354168 3.770833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.750.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.770833969116211 40.354168 3.8125005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.792.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.8125005960464478 40.354168 3.854167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.833.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.854167342185974 40.354168 3.895833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.875.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.895833969116211 40.354168 3.9375005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.917.txt' 1

```



```
BOUND SEGM XY 3.9375005960464478 40.354168 3.958334 40.354168
VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.958.txt' 1
```

```
! Input -
```

```
Fisica_-----
```

```
PROP BSBT
```

```
NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 98 NONSTAT 15 0.1
```

```
! Output -
```

```
Dades_-----
```

```
POINTS 'Banyuls' 3.1682853877913697 42.48828572859176
```

```
TABLE 'Banyuls' HEADER './Boies/07-Banyuls.dat' TIME BOTLEV HSIG
PER RTP DIR PDIR OUT 20170701.000000 1. HR
```

```
POINTS 'Begur' 3.6449299387818432 41.91434534117294
```

```
TABLE 'Begur' HEADER './Boies/07-Begur.dat' TIME BOTLEV HSIG PER
RTP DIR PDIR OUT 20170701.000000 1. HR
```

```
POINTS 'Tgn' 1.468494133536982 40.699926760702475
```

```
TABLE 'Tgn' HEADER './Boies/07-Tgn.dat' TIME BOTLEV HSIG PER RTP
DIR PDIR OUT 20170701.000000 1. HR
```

```
POINTS 'Bcnc' 2.2012645653853986 41.320745842834846
```

```
TABLE 'Bcnc' HEADER './Boies/07-Bcn_co.dat' TIME BOTLEV HSIG PER
RTP DIR PDIR OUT 20170701.000000 1. HR
```

```
POINTS 'Tgnc' 1.1904967455119329 41.0701966332169
```

```
TABLE 'Tgnc' HEADER './Boies/07-Tgn_co.dat' TIME BOTLEV HSIG PER
RTP DIR PDIR OUT 20170701.000000 1. HR
```

```
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '/scratch/javier.rodriquez.gallego/07.
```

```
mat' LAY 3 XP YP BOTLEV HSIG PER RTP _
```

```
DIR PDIR 1 OUT 20170701.000000 1. HR
```

```
! Inici
```

```
calcul_-----
```

```
COMPUTE NONStationary 20170701.000000 1 HR 20170801.000000
```

```
HOTFILE '/scratch/javier.rodriguez.gallego/Anidament/07'  
    UNFORMATTED  
STOP
```

## Archivo para el mes de Agosto de 2017

PROJ 'Costa Catalana' 'Cat'

SET NAUTICAL

MODE NONSTATIONARY

COORDINATES SPHERICAL CCM

! Malla

computacional\_-----

CGRID REG 0.41666722 40.354168 0. 3.5416667 2.333332 300 259

CIRcle 36 0.01 1

! Input -

Batimetria\_-----

INPGRID BOTTOM REG 0.061279296875 39.950927197933176 0.00 1930

1539 0.00208333333333 0.00208333333333

READINP BOTTOM 1. './Batimetria/EMODNET\_Cat.dat' 1 0 FREE

! Input -

Vent\_-----

INPGRID WIND REGULAR -5.5 34.5 0. 225 105 0.1 0.1 \_

NONSTATIONARY 20170801.000000 1 HR 20170901.000000

READINP WIND 1 SERIES './Vent/082017.txt' 3 0 0 0 FREE

! Input -

Prediccio\_-----

INIT HOTSTART MULTIPLE '/scratch/javier.rodriguez.gallego/

Anidament/07' UNFORMATTED

BOUND SHAP JON 3.3 PEAK DSPR DEGR

! Nord

BOUND SEGM XY 3.083334 42.6875 3.104167342185974 42.6875 VAR

FILE 0. './Prediccio/N-3.083.txt' 1

BOUND SEGM XY 3.104167342185974 42.6875 3.145833969116211

```

42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.125.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.145833969116211 42.6875 3.1875005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.167.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.1875005960464478 42.6875 3.229167342185974
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.208.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.229167342185974 42.6875 3.270833969116211
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.250.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.270833969116211 42.6875 3.3125005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.292.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.3125005960464478 42.6875 3.354167342185974
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.333.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.354167342185974 42.6875 3.395833969116211
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.375.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.395833969116211 42.6875 3.4375005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.417.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.4375005960464478 42.6875 3.479167342185974
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.458.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.479167342185974 42.6875 3.520833969116211
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.500.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.520833969116211 42.6875 3.5625005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.542.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.5625005960464478 42.6875 3.604167342185974
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.583.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.604167342185974 42.6875 3.645833969116211
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.625.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.645833969116211 42.6875 3.6875005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.667.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.6875005960464478 42.6875 3.729167342185974
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.708.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.729167342185974 42.6875 3.770833969116211
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.750.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.770833969116211 42.6875 3.8125005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.792.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.8125005960464478 42.6875 3.854167342185974
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.833.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.854167342185974 42.6875 3.895833969116211
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.875.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.895833969116211 42.6875 3.9375005960464478
42.6875 VAR FILE 0. './Prediccio/N-3.917.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.9375005960464478 42.6875 3.958334 42.6875 VAR
FILE 0. './Prediccio/N-3.958.txt' 1

```

```

! Est
BOUND SEGM XY 3.958334 40.354168 3.958334 40.375 VAR FILE 0. './
  Prediccio/E-40.354.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.375 3.958334 40.41666603088379 VAR
  FILE 0. './Prediccio/E-40.396.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.41666603088379 3.958334
  40.45833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.438.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.45833396911621 3.958334 40.5 VAR FILE
  0. './Prediccio/E-40.479.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.5 3.958334 40.54166603088379 VAR FILE
  0. './Prediccio/E-40.521.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.54166603088379 3.958334
  40.58333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.562.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.58333396911621 3.958334 40.625 VAR
  FILE 0. './Prediccio/E-40.604.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.625 3.958334 40.66666603088379 VAR
  FILE 0. './Prediccio/E-40.646.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.66666603088379 3.958334
  40.70833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.688.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.70833396911621 3.958334 40.75 VAR FILE
  0. './Prediccio/E-40.729.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.75 3.958334 40.79166603088379 VAR FILE
  0. './Prediccio/E-40.771.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.79166603088379 3.958334
  40.83333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.812.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.83333396911621 3.958334 40.875 VAR
  FILE 0. './Prediccio/E-40.854.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.875 3.958334 40.91666603088379 VAR
  FILE 0. './Prediccio/E-40.896.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.91666603088379 3.958334
  40.95833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-40.938.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 40.95833396911621 3.958334 41.0 VAR FILE
  0. './Prediccio/E-40.979.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.0 3.958334 41.04166603088379 VAR FILE
  0. './Prediccio/E-41.021.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.04166603088379 3.958334
  41.08333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.062.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.08333396911621 3.958334 41.125 VAR
  FILE 0. './Prediccio/E-41.104.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.125 3.958334 41.16666603088379 VAR

```

```

FILE 0. './Prediccio/E-41.146.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.16666603088379 3.958334
41.20833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.188.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.20833396911621 3.958334 41.25 VAR FILE
0. './Prediccio/E-41.229.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.25 3.958334 41.29166603088379 VAR FILE
0. './Prediccio/E-41.271.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.29166603088379 3.958334
41.33333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.312.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.33333396911621 3.958334 41.375 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-41.354.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.375 3.958334 41.41666603088379 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-41.396.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.41666603088379 3.958334
41.45833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.438.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.45833396911621 3.958334 41.5 VAR FILE
0. './Prediccio/E-41.479.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.5 3.958334 41.54166603088379 VAR FILE
0. './Prediccio/E-41.521.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.54166603088379 3.958334
41.58333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.562.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.58333396911621 3.958334 41.625 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-41.604.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.625 3.958334 41.66666603088379 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-41.646.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.66666603088379 3.958334
41.70833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.688.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.70833396911621 3.958334 41.75 VAR FILE
0. './Prediccio/E-41.729.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.75 3.958334 41.79166603088379 VAR FILE
0. './Prediccio/E-41.771.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.79166603088379 3.958334
41.83333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.812.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.83333396911621 3.958334 41.875 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-41.854.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.875 3.958334 41.91666603088379 VAR
FILE 0. './Prediccio/E-41.896.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.91666603088379 3.958334
41.95833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-41.938.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.958334 41.95833396911621 3.958334 42.0 VAR FILE
0. './Prediccio/E-41.979.txt' 1

```

BOUND SEGM XY 3.958334 42.0 3.958334 42.04166603088379 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-42.021.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.04166603088379 3.958334  
 42.08333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.062.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.08333396911621 3.958334 42.125 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-42.104.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.125 3.958334 42.16666603088379 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-42.146.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.16666603088379 3.958334  
 42.20833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.188.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.20833396911621 3.958334 42.25 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-42.229.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.25 3.958334 42.29166603088379 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-42.271.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.29166603088379 3.958334  
 42.33333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.312.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.33333396911621 3.958334 42.375 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-42.354.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.375 3.958334 42.41666603088379 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-42.396.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.41666603088379 3.958334  
 42.45833396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.438.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.45833396911621 3.958334 42.5 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-42.479.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.5 3.958334 42.54166603088379 VAR FILE  
 0. './Prediccio/E-42.521.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.54166603088379 3.958334  
 42.58333396911621 VAR FILE 0. './Prediccio/E-42.562.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.58333396911621 3.958334 42.625 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-42.604.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.625 3.958334 42.66666603088379 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-42.646.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.958334 42.66666603088379 3.958334 42.6875 VAR  
 FILE 0. './Prediccio/E-42.688.txt' 1

! Sud

BOUND SEGM XY 0.41666722 40.354168 0.4375005513429642 40.354168  
 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.417.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.4375005513429642 40.354168 0.4791672080755234  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.458.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 0.4791672080755234 40.354168 0.5208338797092438

```

40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.500.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.5208338797092438 40.354168 0.5625005662441254
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.542.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.5625005662441254 40.354168 0.6041672229766846
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.583.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.6041672229766846 40.354168 0.6458338797092438
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.625.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.6458338797092438 40.354168 0.6875005662441254
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.667.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.6875005662441254 40.354168 0.7291672229766846
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.708.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.7291672229766846 40.354168 0.7708338797092438
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.750.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.7708338797092438 40.354168 0.8125005662441254
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.792.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.8125005662441254 40.354168 0.854167252779007
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.833.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.854167252779007 40.354168 0.8958339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.875.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.8958339095115662 40.354168 0.9375005662441254
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.917.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.9375005662441254 40.354168 0.979167252779007
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-0.958.txt' 1
BOUND SEGM XY 0.979167252779007 40.354168 1.0208339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.000.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.0208339095115662 40.354168 1.062500536441803
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.042.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.062500536441803 40.354168 1.1041672229766846
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.083.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.1041672229766846 40.354168 1.1458339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.125.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.1458339095115662 40.354168 1.1875005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.167.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.1875005960464478 40.354168 1.2291672825813293
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.208.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.2291672825813293 40.354168 1.2708339095115662
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.250.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.2708339095115662 40.354168 1.3125005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.292.txt' 1
BOUND SEGM XY 1.3125005960464478 40.354168 1.3541672825813293
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.333.txt' 1

```



BOUND SEGM XY 1.3541672825813293 40.354168 1.3958339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.375.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.3958339095115662 40.354168 1.4375005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.417.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.4375005960464478 40.354168 1.4791672825813293  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.458.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.4791672825813293 40.354168 1.5208339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.500.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.5208339095115662 40.354168 1.5625005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.542.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.5625005960464478 40.354168 1.6041672825813293  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.583.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.6041672825813293 40.354168 1.6458339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.625.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.6458339095115662 40.354168 1.6875005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.667.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.6875005960464478 40.354168 1.7291672825813293  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.708.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.7291672825813293 40.354168 1.7708339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.750.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.7708339095115662 40.354168 1.8125005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.792.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.8125005960464478 40.354168 1.8541672825813293  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.833.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.8541672825813293 40.354168 1.8958339095115662  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.875.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.8958339095115662 40.354168 1.9375005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.917.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.9375005960464478 40.354168 1.9791673421859741  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-1.958.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 1.9791673421859741 40.354168 2.020833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.000.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.020833969116211 40.354168 2.0625005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.042.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.0625005960464478 40.354168 2.104167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.083.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.104167342185974 40.354168 2.145833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.125.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.145833969116211 40.354168 2.1875005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.167.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 2.1875005960464478 40.354168 2.229167342185974

```

40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.208.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.229167342185974 40.354168 2.270833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.250.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.270833969116211 40.354168 2.3125005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.292.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.3125005960464478 40.354168 2.354167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.333.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.354167342185974 40.354168 2.395833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.375.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.395833969116211 40.354168 2.4375005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.417.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.4375005960464478 40.354168 2.479167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.458.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.479167342185974 40.354168 2.520833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.500.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.520833969116211 40.354168 2.5625005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.542.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.5625005960464478 40.354168 2.604167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.583.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.604167342185974 40.354168 2.645833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.625.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.645833969116211 40.354168 2.6875005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.667.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.6875005960464478 40.354168 2.729167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.708.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.729167342185974 40.354168 2.770833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.750.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.770833969116211 40.354168 2.8125005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.792.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.8125005960464478 40.354168 2.854167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.833.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.854167342185974 40.354168 2.895833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.875.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.895833969116211 40.354168 2.9375005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.917.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.9375005960464478 40.354168 2.979167342185974
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-2.958.txt' 1
BOUND SEGM XY 2.979167342185974 40.354168 3.020833969116211
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.000.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.020833969116211 40.354168 3.0625005960464478
40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.042.txt' 1

```

BOUND SEGM XY 3.0625005960464478 40.354168 3.104167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.083.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.104167342185974 40.354168 3.145833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.125.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.145833969116211 40.354168 3.1875005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.167.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.1875005960464478 40.354168 3.229167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.208.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.229167342185974 40.354168 3.270833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.250.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.270833969116211 40.354168 3.3125005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.292.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.3125005960464478 40.354168 3.354167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.333.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.354167342185974 40.354168 3.395833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.375.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.395833969116211 40.354168 3.4375005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.417.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.4375005960464478 40.354168 3.479167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.458.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.479167342185974 40.354168 3.520833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.500.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.520833969116211 40.354168 3.5625005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.542.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.5625005960464478 40.354168 3.604167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.583.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.604167342185974 40.354168 3.645833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.625.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.645833969116211 40.354168 3.6875005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.667.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.6875005960464478 40.354168 3.729167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.708.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.729167342185974 40.354168 3.770833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.750.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.770833969116211 40.354168 3.8125005960464478  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.792.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.8125005960464478 40.354168 3.854167342185974  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.833.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.854167342185974 40.354168 3.895833969116211  
 40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.875.txt' 1  
 BOUND SEGM XY 3.895833969116211 40.354168 3.9375005960464478

```

40.354168 VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.917.txt' 1
BOUND SEGM XY 3.9375005960464478 40.354168 3.958334 40.354168
VAR FILE 0. './Prediccio/S-3.958.txt' 1

```

! Input -

Fisica\_-----

PROP BSBT

NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 98 NONSTAT 15 0.1

! Output -

Dades\_-----

POINTS 'Banyuls' 3.1682853877913697 42.48828572859176

TABLE 'Banyuls' HEADER './Boies/08-Banyuls.dat' TIME BOTLEV HSIG  
PER RTP DIR PDIR OUT 20170801.000000 1. HR

POINTS 'Begur' 3.6449299387818432 41.91434534117294

TABLE 'Begur' HEADER './Boies/08-Begur.dat' TIME BOTLEV HSIG PER  
RTP DIR PDIR OUT 20170801.000000 1. HR

POINTS 'Tgn' 1.468494133536982 40.699926760702475

TABLE 'Tgn' HEADER './Boies/08-Tgn.dat' TIME BOTLEV HSIG PER RTP  
DIR PDIR OUT 20170801.000000 1. HR

POINTS 'Bcnc' 2.2012645653853986 41.320745842834846

TABLE 'Bcnc' HEADER './Boies/08-Bcn\_co.dat' TIME BOTLEV HSIG PER  
RTP DIR PDIR OUT 20170801.000000 1. HR

POINTS 'Tgnc' 1.1904967455119329 41.0701966332169

TABLE 'Tgnc' HEADER './Boies/08-Tgn\_co.dat' TIME BOTLEV HSIG PER  
RTP DIR PDIR OUT 20170801.000000 1. HR

BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '/scratch/javier.rodriguez.gallego/08.

mat' LAY 3 XP YP BOTLEV HSIG PER RTP \_  
DIR PDIR 1 OUT 20170801.000000 1. HR

! Inici

calcul\_-----

COMPUTE NONStationary 20170801.000000 1 HR 20170901.000000

```
HOTFILE '/scratch/javier.rodriguez.gallego/Anidament/08'  
    UNFORMATTED  
STOP
```



# Anejo de cálculo y posproceso

En este anejo se adjunta gran parte del código utilizado para el cálculo estadístico y posproceso de archivos de este estudio. Para la ejecución correcta del código es necesario tener instalado un entorno del lenguaje Python versión 3 o superior, y los siguientes paquetes:

- *numpy* para el cálculo numérico
- *matplotlib* para la representación de gráficos
- *netcdf4* y *h5py* para el tratamiento de archivos netCDF
- *cartopy* para la representación cartográfica

Tanto el *core* de Python como los paquetes se van actualizando y mejorando constantemente, por lo que es posible que algún fragmento del código no funcione debido a dichas modificaciones.

A continuación se incluye la librería que se ha programado específicamente para esta tesina, y un archivo de ejemplo para realizar la colocación.

## Librería CMEMS

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-
# =====
# Llibreries necessaries
# =====

import os
import sys
import statistics
import numpy as np
import netCDF4 as netc
import datetime as dt
from datetime import datetime
from matplotlib.dates import date2num
import matplotlib
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.font_manager as fm
import cartopy.crs as ccrs
from skill_metrics import centered_rms_dev
from cartopy import config
from cartopy.io.shapereader import Reader
from cartopy.feature import ShapelyFeature
from cartopy.io.img_tiles import GoogleTiles
from cartopy.mpl.gridliner import LONGITUDE_FORMATTER, \
    LATITUDE_FORMATTER
from math import radians, cos, sin, asin, sqrt
from matplotlib.offsetbox import AnchoredText

# =====
# Utils
# =====

def haversine(
    lon1,
    lat1,
    lon2,
    lat2,
):
    '''
    ....Calcula la distancia entre dos puntos segons Haversine (
        cercle maxim).
    ....'''

    (lon1, lat1, lon2, lat2) = map(radians, [lon1, lat1, lon2,
        lat2])
    dlon = lon2 - lon1
    dlat = lat2 - lat1
    a = sin(dlat / 2) ** 2 + cos(lat1) * cos(lat2) * sin(dlon /
        2) ** 2
    c = 2 * asin(sqrt(a))
    r = 6371 # Radi de la terra, en Km
    return c * r

def minim(matriu, valor):

```



```

'''
....Amb una matriu i un valor et torna el valor mes proper.
....'''

i = np.abs(matriu - valor).argmin()
return matriu[i]

def iminim(matriu, valor):
'''
....Amb una matriu i un valor et torna l'index del valor mes
proper.
....'''

i = np.abs(matriu - valor).argmin()
return i

def fitxers_ncf(carpeta):
'''
....Amb una carpeta, torna tots els fitxers NetCDF.
....'''

llista_fitxers = []
fitxers = [f for f in os.listdir(carpeta)]
for f in fitxers:
    if f.endswith('.nc'):
        rutacompleta = carpeta + '/' + f
        llista_fitxers += [rutacompleta]
if len(llista_fitxers) == 0:
    print 'No hi ha cap fitxer NetCDF a la carpeta %s.' %
        carpeta
return llista_fitxers

def aprop(llista_fitxers):
'''
....Comprova que els fitxers de satellit només passin pel
Mediterrani
....'''

```

```

llista_aprop = []
i = 1
okey = 0
esborrat = 0
for fitxer in llista_fitxers:
    dins = 0
    with netc.Dataset(fitxer) as sat:
        nom_satelit = getattr(sat, 'platform')

        # Data, longitud, latitud i alcada del satellit

        pos = np.column_stack((netc.num2date((sat.variables[
            'time'
                                ])[:], sat.variables['time'].
                                units),
                                (sat.variables['longitude'])
                                [:],
                                (sat.variables['latitude'])
                                [:],
                                (sat.variables['VAVH'])[:]))

        i += 1
        for (t, x, y, h) in pos:
            if x > -5.5 and x < 36.29:
                if y > 30.18 and y < 45.97:
                    llista_aprop += [fitxer]
                    dins = 1
        if dins == 0:
            os.remove(fitxer)
            esborrat += 1
        else:
            okey += 1
print '%%s passen a prop del Mediterrani. Netejats %%s' %
    fitxers.' \
    % (okey, esborrat)
return llista_aprop

```

```

def aprop_cat(llista_fitxers):
    '''

```

```

....Comprova que els fitxers de satellit nomes passin per la
    malla de SWAN. Si no, esborra el fitxer.

```

```

....'''

llista_aprop = []
i = 1
okey = 0
esborrat = 0
for fitxer in llista_fitxers:
    dins = 0
    with netc.Dataset(fitxer) as sat:
        nom_satelit = getattr(sat, 'platform')

        # Data, longitud, latitud i alcada del satellit

        pos = np.column_stack((netc.num2date((sat.variables[
            'time'

                                                    ])[:], sat.variables['time'].
                                                    units),
                                (sat.variables['longitude'])
                                [:],
                                (sat.variables['latitude'])
                                [:],
                                (sat.variables['VAVH'])[:]))

        i += 1
        for (t, x, y, h) in pos:
            if x > 0.41 and x < 3.93:
                if y > 40.35 and y < 42.68:
                    llista_aprop += [fitxer]
                    dins = 1
        if dins == 0:
            os.remove(fitxer)
            esborrat += 1
        else:
            okey += 1
print '%%s passen a prop de Catalunya. Netejats %%s fitxers.'
    '\
    %(okey, esborrat)
return llista_aprop

def fitxers_amb_variable(carpeta, var):
    '''

```

```

....Amb una carpeta i una variable, torna una llista amb tots
els fitxers NetCDF.
....'''

llista_fitxers = []
fitxers = [f for f in os.listdir(carpeta)]
i = 0
for f in fitxers:
    if f.endswith('.nc'):
        with netc.Dataset(carpeta + '/' + f) as fitxer:
            variables_fitxer = fitxer.variables.keys()
            if var in variables_fitxer:
                rutaCompleta = carpeta + '/' + f
                llista_fitxers += [rutaCompleta]
                i += 1
print 'Trobat %s fitxers amb la variable %s.' % (i, var)
return llista_fitxers

def prediccio_fitxer(llista_fitxers, data):
    '''
....Amb una data concreta, retorno el fitxer de prediccio
corresponent.
....'''

    d = data.date()
    h = data.hour
    candidat = 'nul'
    if h > 11:
        dia = d
        dia = dia + dt.timedelta(days=1)
        cadena = str(dia.year) + str('%02d' % dia.month) + str('%02d'
            % dia.day)
    else:
        cadena = str(d.year) + str('%02d' % d.month) + str('%02d'
            % d.day)
    for f in llista_fitxers:
        nomfitxer = os.path.basename(f)
        if nomfitxer[:8] == cadena:

```

```

        candidat = f
    if candidat == 'nul':
        print 'No hi ha cap fitxer que coincideixi amb el dia: \
            %s' \
            % cadena
        return
    else:
        return candidat

def boia_nom(rutafitxer):
    '''
    ....Modifica el nom de la boia per quelcom mes intel·ligible.
    ....'''

    with netc.Dataset(rutafitxer) as boia:
        nom_boia = getattr(boia, 'wmo_platform_code')
        if len(nom_boia) < 3:
            nom_boia = getattr(boia, 'platform_code')

    # Menorca

    if nom_boia == '61197':
        nom_boia = 'Mao'
    elif nom_boia == 'SON-BLANC':
        nom_boia = 'Son Blanc'
    elif nom_boia == '61430':

    # Mallorca

        nom_boia = 'Sa Dragonera'
    elif nom_boia == '61141':

    # Menorca

        nom_boia = 'Canal d\'Eivissa'
    elif nom_boia == '61281':

    # Valencia

        nom_boia = 'Valencia'

```

```
elif nom_boia == '61280':
```

```
# Catalunya
```

```
    nom_boia = 'Tarragona'
```

```
elif nom_boia == 'Tarragona-coast-buoy':
```

```
    nom_boia = 'Tarragona_Coast'
```

```
elif nom_boia == 'Barcelona-coast-buoy':
```

```
    nom_boia = 'Barcelona_Coast'
```

```
elif nom_boia == '61196':
```

```
    nom_boia = 'Begur'
```

```
elif nom_boia == '6100002':
```

```
    nom_boia = 'l\Escala'
```

```
elif nom_boia == '61188':
```

```
# Franca
```

```
    nom_boia = 'Banyuls'
```

```
elif nom_boia == '61191':
```

```
    nom_boia = 'Leucate'
```

```
elif nom_boia == '61190':
```

```
    nom_boia = 'Sete'
```

```
elif nom_boia == '61431':
```

```
    nom_boia = 'Espiguette'
```

```
elif nom_boia == '61284':
```

```
    nom_boia = 'Mesurho'
```

```
elif nom_boia == '61289':
```

```
    nom_boia = 'Le_Planier'
```

```
elif nom_boia == '61021':
```

```
    nom_boia = 'Porquerolles'
```

```
elif nom_boia == '6100021':
```

```
    nom_boia = 'Porquerolles_(old/inactive)'
```

```
else:
```

```
    nom_boia = nom_boia
```

```
return nom_boia
```

```
def boia_nomcurt(rutafitxer):
```

```
    '''
```

```
....Modifica el nom de la boia per quelcom mes intel·ligible.
```

```
....'''
```

```

with netc.Dataset(rutafitxer) as boia:
    nom_boia = getattr(boia, 'wmo_platform_code')
    if len(nom_boia) < 3:
        nom_boia = getattr(boia, 'platform_code')

# Menorca

if nom_boia == '61197':
    nom_boia = 'mao'
elif nom_boia == '61430':

# Mallorca

    nom_boia = 'drag'
elif nom_boia == '61281':

# Valencia

    nom_boia = 'vlc'
elif nom_boia == '61280':

# Catalunya

    nom_boia = 'tgn'
elif nom_boia == 'Tarragona-coast-buoy':
    nom_boia = 'tgnc'
elif nom_boia == 'Barcelona-coast-buoy':
    nom_boia = 'bcnc'
elif nom_boia == '61196':
    nom_boia = 'begur'
elif nom_boia == '61188':

# Franca

    nom_boia = 'banyuls'
elif nom_boia == '61191':
    nom_boia = 'leucate'
elif nom_boia == '61190':
    nom_boia = 'sete'
elif nom_boia == '61431':

```

```

        nom_boia = 'espiguette'
    elif nom_boia == '61284':
        nom_boia = 'mesurho'
    elif nom_boia == '61289':
        nom_boia = 'planier'
    elif nom_boia == '61021':
        nom_boia = 'porquerolles'
    else:
        nom_boia = nom_boia
    return nom_boia

def boia_dist(rutafitxer):
    '''
    ....Distancia de cada boia fins la costa.
    ....Mesurada amb http://www.ifremer.fr/co/co05010507/html/
    ....platform.html
    ....'''

    with netc.Dataset(rutafitxer) as boia:
        nom_boia = getattr(boia, 'wmo_platform_code')
        if len(nom_boia) < 3:
            nom_boia = getattr(boia, 'platform_code')
        if nom_boia == '61197':
            dist = 16.8
        elif nom_boia == 'SON-BLANC':
            dist = 0.1
        elif nom_boia == '61430':

            # Mallorca

            dist = 17.8
        elif nom_boia == '61141':

            # Menorca

            dist = 35.4
        elif nom_boia == '61281':

            # Valencia

```



```

        dist = 41.8
    elif nom_boia == '61280':

        # Catalunya

        dist = 57.6
    elif nom_boia == 'Tarragona-coast-buoy':
        dist = 1.1
    elif nom_boia == 'Barcelona-coast-buoy':
        dist = 3.2
    elif nom_boia == '61196':
        dist = 36
    elif nom_boia == '6100002':
        dist = 118
    elif nom_boia == '61188':

        # Franca

        dist = 1.7
    elif nom_boia == '61191':
        dist = 5
    elif nom_boia == '61190':
        dist = 6.3
    elif nom_boia == '61431':
        dist = 6
    elif nom_boia == '61284':
        dist = 1.8
    elif nom_boia == '61289':
        dist = 9.1
    elif nom_boia == '61021':
        dist = 1.9
    else:
        dist = 0
    return dist

def sat_nom(rutafitxer):
    '''
    ....Obte el nom d'un fitxer de satel·lit
    ....'''

```

```

with netc.Dataset(rutafitxer) as sat:
    nom_satelit = getattr(sat, 'platform')
return nom_satelit

# =====
# Boies, satellits, prediccio
# =====

def boia_swan(fitxer, dia, dia_f):
    fswan = open(fitxer, 'r')
    contingut = fswan.readlines()
    swan = np.empty([0, 7])
    for (i, line) in enumerate(contingut):
        if i > 6:
            tro = line.split()
            data = datetime.strptime(tro[0], '%Y%m%d.%H%M%S')
            if data >= dia and data <= dia_f:
                swan = np.vstack([swan, [
                    data,
                    tro[1],
                    float(tro[2]),
                    tro[3],
                    tro[4],
                    tro[5],
                    tro[6],
                ]])

    return swan

def boia_swan_dates(fitxer, llista_dates):
    fswan = open(fitxer, 'r')
    contingut = fswan.readlines()
    temp = np.empty([0, 1])
    for (i, line) in enumerate(contingut):
        if i > 6:
            tro = line.split()
            data = datetime.strptime(tro[0], '%Y%m%d.%H%M%S')
            temp = np.vstack([temp, [data]])

    # Un cop tinc totes les dates, busco les que m'interessin

```

```

swan = np.empty([0, 7])
for moment in llista_dates:
    dia = min(temp[:, 0], key=lambda x: abs(x - moment))
    for (i, line) in enumerate(contingut):
        if i > 6:
            tro = line.split()
            data = datetime.strptime(tro[0], '%Y%m%d.%H%M%S'
                                     )
            if data == dia:
                swan = np.vstack([swan, [
                    data,
                    tro[1],
                    float(tro[2]),
                    tro[3],
                    tro[4],
                    tro[5],
                    tro[6],
                ]])

return swan

def boia_posicio(fitxer):
    '''
    ....Amb un fitxer de boia, et torna la seva longitud i latitud.
    ....'''

    with netc.Dataset(fitxer) as boia:
        pos_qc = []
        pos_qc = np.append(pos_qc, (boia.variables['POSITION_QC']
                                    )[:])

        lons = []
        lons = np.append(lons, (boia.variables['LONGITUDE'])[:])
        lons = np.ma.masked_where(pos_qc != 1, lons)

        lats = []
        lats = np.append(lats, (boia.variables['LATITUDE'])[:])
        lats = np.ma.masked_where(pos_qc != 1, lats)

    # Si hi ha mes dades bones que dolentes, calculo posicio

```

```

        amb la mitja

if len(lons) > np.ma.count_masked(lons) and len(lats) \
    > np.ma.count_masked(lats):
    lon_boia = np.nanmean(lons)
    lat_boia = np.nanmean(lats)
else:

    # print('\n Posicio: %s, %s' %(lon_boia, lat_boia))

    lon_boia = lat_boia = 0
    print 'La boia no te dades de posicio bones (QC!=1)
        .'
    return (lon_boia, lat_boia)

def boia_variable_interval(
    fitxer,
    variable,
    data_ini,
    data_fi,
    ):
    '''
    ....Amb un fitxer, una variable, i les dates d'inici i fi,
        retorna una matriu
    ....amb data, valor.
    ....'''

    data = var = var_qc = []
    dades_boia = np.empty([0, 2])
    boies_rares = [
        '61196',
        '61197',
        '61280',
        '61281',
        '61430',
        '61141',
    ]

    print '\nLlegint dades de %s de la boia.' % variable
    with netc.Dataset(fitxer) as boia:

```

```

    # index que coincideixi amb la data

    i = netc.date2index(data_ini, boia.variables['TIME'],
                        select='nearest')
    f = netc.date2index(data_fi, boia.variables['TIME'],
                        select='nearest')

    nom_boia = getattr(boia, 'wmo_platform_code')
    if len(nom_boia) < 3:
        nom_boia = getattr(boia, 'platform_code')

    # Evito errors amb boies que tenen 2 columnes

    if nom_boia in boies_rares:
        columna = 1
    else:
        columna = 0
    data = np.append(data, netc.num2date((boia.variables['TIME'
        ])[i:f], boia.variables['TIME'].units))
    var = np.append(var, boia.variables[variable][i:f,
        columna])
    var_qc = np.append(var_qc, boia.variables[variable + '
        _QC'][i:
        f, columna])
    dades_boia = np.column_stack((data, var))
    dades_boia[:, 1] = np.ma.masked_where(var_qc != 1,
        dades_boia[:, 1])
    dades_boia = dades_boia[dades_boia[:, 1].mask == False]
    return dades_boia

def boia_variable_dates(fitxer, variable, llista_instants):
    '''
    ....Amb un fitxer, una variable, i una llista de datets, retorna
        una matriu
    ....amb data, valor.
    ....'''

    data = []
    var = []

```

```

var_qc = []
dades_boia = np.empty([0, 2])
boies_rares = [
    '61196',
    '61197',
    '61280',
    '61281',
    '61430',
    '61141',
    'SON-BLANC',
]
for moment in llista_instants:
    d = moment.date()
    with netc.Dataset(fitxer) as boia:

        # index que coincideixi amb la data

        i = netc.date2index(moment, boia.variables['TIME'],
                               select='nearest')
        idata = netc.num2date(boia.variables['TIME'][i],
                               boia.variables['TIME'].units)

        nom_boia = getattr(boia, 'wmo_platform_code')
        if len(nom_boia) < 3:
            nom_boia = getattr(boia, 'platform_code')

        # Evito errors amb boies que tenen 2 columnes

        if nom_boia in boies_rares:
            columna = 1
        else:
            columna = 0
        try:

            # Afegeixo valors de la boia a la matriu

            data = np.append(data, idata)
            var = np.append(var, boia.variables[variable][i,
                                                         columna])
            var_qc = np.append(var_qc, boia.variables[
                variable

```

```

        + '_QC'][i, columna])
    except:
        print 'Les dades de la boia son inconsistentes.'
try:
    dades_boia = np.column_stack((data, var))
    dades_boia[:, 1] = np.ma.masked_where(var_qc != 1,
        dades_boia[:, 1])
except:

    # dades_boia = dades_boia[~dades_boia[:,1].mask]

    dades_boia = np.empty([0, 2])
    print 'Error llegint dades de la boia.'

    # print (' Afegits %s dies.' % len(dades_boia))

return dades_boia

def prediccio_variable_interval(
    llista_fitxers,
    variable,
    boia,
    data_ini,
    data_fi,
    ):
    '''
    ....Amb la llista de fitxers, la variable, i les dates d'inici i
        fi, retorna una matriu
    ....amb data, valor de la prediccio.
    ....'''

    print '\nLlegint dades de %s de prediccio.' % variable
    dades_pred = np.empty([0, 2])
    data = []
    var = []

    # Itero dia per dia

    d = data_ini

```

```

delta = dt.timedelta(days=1)
while d <= data_fi:
    fitxer = prediccio_fitxer(llista_fitxers, d)
    with netc.Dataset(fitxer) as predi:
        predi.set_auto_mask(False)
        predi.set_auto_scale(True)
        i = netc.date2index(data_ini, predi.variables['time'
            ],
                                select='nearest')
        f = netc.date2index(data_fi, predi.variables['time'
            ],
                                select='nearest')

        lons_pred = []
        lons_pred = np.append(lons_pred,
                                (predi.variables['longitude'])
                                [:])

        lon_pred = iminim(lons_pred, boia[0])
        lats_pred = []
        lats_pred = np.append(lats_pred, (predi.variables['
            latitude'
                                ][:]))

        lat_pred = iminim(lats_pred, boia[1])
        data = np.append(data, netc.num2date((predi.
            variables['time'
                                ])[i:f], predi.variables['time'].
                                units))

        var = np.append(var, predi.variables[variable][i:f,
            lat_pred, lon_pred])

    d += delta
dades_pred = np.column_stack((data, var))
return dades_pred

```

```

def prediccio_variable_dates(
    llista_fitxers,
    variable,
    boia,
    llista_instants,
):
    '''
    ....Amb llista de fitxers, la variable, i llista de dates,

```



```

    retorna una matriu
....amb data, valor de la predicció.
....'''

dades_pred = np.empty([0, 2])
data = []
var = []

# Itero dia per dia

for moment in llista_instants:
    fitxer = prediccio_fitxer(llista_fitxers, moment)
    with netc.Dataset(fitxer) as predi:
        predi.set_auto_mask(False)
        predi.set_auto_scale(True)

        # index que coincideixi amb la data

        i = netc.date2index(moment, predi.variables['time'],
                             select='nearest')
        idata = netc.num2date(predi.variables['time'][i],
                              predi.variables['time'].units)

        lons_pred = []
        lons_pred = np.append(lons_pred,
                              (predi.variables['longitude']
                               [:]))
        lon_pred = iminim(lons_pred, boia[0])

        lats_pred = []
        lats_pred = np.append(lats_pred, (predi.variables['
            latitude'
                                     ][:]))
        lat_pred = iminim(lats_pred, boia[1])

        data = np.append(data, netc.num2date(predi.variables
            ['time'
                                     ]
            [i], predi.variables['time'].units
            ))
        var = np.append(var, predi.variables[variable][i,
            lat_pred,

```

```

        lon_pred])
    dades_pred = np.column_stack((data, var))
    return dades_pred

def sat_collocacio_dates(
    boia,
    llista_fitxers,
    ini,
    fi,
):
    '''
    ....Fa la colocacio dels satellits respecte la boia.
    ....'''

    # print('\n Iniciant collocacio:')

    satelit = np.empty([0, 5])
    i = 1
    total = len(llista_fitxers)
    for fitxer in llista_fitxers:
        temp = np.empty([0, 4]) # Nom, data, distancia, alcada
        with netc.Dataset(fitxer) as sat:
            nom_satelit = getattr(sat, 'platform')
            pos = np.column_stack((netc.num2date((sat.variables[
                'time'
                ])[:], sat.variables['time'].
                    units),
                (sat.variables['longitude'])
                    [:],
                (sat.variables['latitude'])
                    [:],
                (sat.variables['VAVH'])[:]))

            i += 1
        for (t, x, y, h) in pos:
            if t > ini and t < fi:
                if h < 20:
                    dist = haversine(x, y, boia[0], boia[1])
                    if dist < 50: # Collocacio a 50km
                        temp = np.vstack((temp, np.array([
                            nom_satelit,

```

```

        t, dist, h]))))

if len(temp) > 2:

    # Pondero els valors

    index = temp[:, 2].argmin()

    coefs = np.array(1 / temp[:, 2])
    pesos = np.array(coefs / coefs.sum())

    dist_mitja = np.average(temp[:, 2], weights=pesos)
    alsada_mitja = np.average(temp[:, 3], weights=pesos)
    data = temp[index, 1] # Agafo la data de quan passa
        mes a prop

    dist_min_sat = np.amin(temp[:, 2])

    # Afegeixo valors a la matriu bona

    satelit = np.vstack((satelit, np.array([data,
        nom_satelit,
                                dist_mitja, dist_min_sat,
                                alsada_mitja])))
    print '___%s_[%s_de_%s]_%s_a_%.1f_km' % (nom_satelit,
        i,
        total, data, dist_mitja)

    # Ordeno les dates de satellit

    satelit = satelit[np.argsort(satelit[:, 0])]

    # print ('  %s punts collocats.' % len(satelit))

    return satelit

def sat_colocacio(boia, llista_fitxers):
    '''
    ....Fa la colocacio dels satellits respecte la boia.
    ....'''

```

```

# print('\n Iniciant collocacio:')

satelit = np.empty([0, 5])
i = 1
total = len(llista_fitxers)
for fitxer in llista_fitxers:
    temp = np.empty([0, 4]) # Nom, data, distancia, alcada
    with netc.Dataset(fitxer) as sat:
        nom_satelit = getattr(sat, 'platform')
        pos = np.column_stack((netc.num2date((sat.variables[
            'time'
                                ][:], sat.variables['time'].
                                units),
                                (sat.variables['longitude'])
                                [:],
                                (sat.variables['latitude'])
                                [:],
                                (sat.variables['VAVH'])[:]))

    i += 1
    for (t, x, y, h) in pos:
        if h < 20:
            dist = haversine(x, y, boia[0], boia[1])
            if dist < 50: # Collocacio a 50km
                temp = np.vstack((temp, np.array([
                    nom_satelit, t,
                    dist, h])))
    if len(temp) > 2:

        # Pondero els valors

        index = temp[:, 2].argmin()

        coefs = np.array(1 / temp[:, 2])
        pesos = np.array(coefs / coefs.sum())

        dist_mitja = np.average(temp[:, 2], weights=pesos)
        alsada_mitja = np.average(temp[:, 3], weights=pesos)
        data = temp[index, 1] # Agafo la data de quan passa
                               mes a prop

        dist_min_sat = np.amin(temp[:, 2])

```

```

        # Afegeixo valors a la matriu bona

        satellit = np.vstack((satellit, np.array([data,
            nom_satellit,
            dist_mitja, dist_min_sat,
            alsada_mitja])))

        # print (' %s [%s de %s] %s a %.1f km' % (
            nom_satellit, i, total, data, dist_mitja))
        # Ordeno les dates de satellit

        satellit = satellit[np.argsort(satellit[:, 0])]

        # print (' %s punts col·locats.' % len(satellit))

        return satellit

# =====
# Estadística
# =====

def RMSE(observat, simulat):
    assert len(observat) == len(simulat)
    n = len(observat)
    assert n > 0
    dif = 0
    for i in range(n):
        numerador = simulat[i] - observat[i]
        dif += numerador * numerador
    return sqrt(dif / n)

def RMSE_centrat(observat, simulat):
    assert len(observat) == len(simulat)
    n = len(observat)
    assert n > 0
    mobservat = msimulat = 0
    for i in range(n):
        mobservat += observat

```

```

        msimulat += simulat
    mobservat = mobservat / n
    msimulat = msimulat / n
    dif = 0
    for i in range(n):
        numerador = simulat[i] - msimulat - (observat[i] -
            mobservat)
        dif += numerador * numerador
    return sqrt(dif / n)

def bias(observat, simulat):
    assert len(observat) == len(simulat)
    n = len(observat)
    assert n > 0
    dif = 0
    for i in range(n):
        dif += simulat[i] - observat[i]
    return dif / n

def SI(rmse, observat):
    n = len(observat)
    assert n > 0
    suma = 0
    for i in range(n):
        suma += observat[i]
    observat_mitjana = suma / n
    return rmse / observat_mitjana

def Correlacio(x, y):
    '''
    ....Coeficient de correlacio entre dos series
    ....'''

    assert len(x) == len(y)
    n = len(x)
    assert n > 0
    avg_x = x.mean()
    avg_y = y.mean()

```

```

diffprod = 0
xdiff2 = 0
ydiff2 = 0
for idx in range(n):
    xdiff = x[idx] - avg_x
    ydiff = y[idx] - avg_y
    diffprod += xdiff * ydiff
    xdiff2 += xdiff * xdiff
    ydiff2 += ydiff * ydiff
return diffprod / np.sqrt(xdiff2 * ydiff2)

# =====
# Mapes
# =====

def boies_mapa(fitxers_boies):
    lons = lats = llista = []
    for element in fitxers_boies:
        titol = boia_nomsimple(element)
        posicio_boia = boia_posicio(element)
        lon = posicio_boia[0]
        lat = posicio_boia[1]
        if lon > -1 and lon < 7 and lat > 38.5 and lat < 44:
            if lon in lons:
                print '\u00a0ja\u00a0esta\u00a0a\u00a0lla\u00a0llista.' % titol
            else:
                print '\n\u00a0Boia:\u00a0%s' % element
                print '\u00a0%s\u00a0%s' % (lon, lat)
                lons = np.append(lons, lon)
                lats = np.append(lats, lat)
                llista = np.append(llista, titol)
    print '\n\u00a0Plotejant\u00a0mapa\u00a0de\u00a0boies...'
    ftitol = fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-Bold.
        otf',
                                size=14)
    fpetit = fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-
        Regular.otf'
                                , size=14)
    fig = plt.subplots(figsize=(16, 8))
    ax = plt.axes(projection=ccrs.Mercator())

```

```

ax.set_extent([-1, 7, 38.5, 44])
ax.scatter(lons, lats, color='yellow', marker='o',
           transform=ccrs.Geodetic())
ax.add_image(Esri(), 8)
gl = ax.gridlines(
    crs=ccrs.PlateCarree(),
    linewidth=0.5,
    color='grey',
    alpha=0.4,
    linestyle='--',
    draw_labels=True,
)
gl.xlabels_top = gl.ylabels_right = None
gl.xformatter = LONGITUDE_FORMATTER
gl.yformatter = LATITUDE_FORMATTER

# text = AnchoredText(r'Esri, HERE, Garmin, GAO, USGS &
# EarthStar Geographics', loc=4, prop={'size': 9}, frameon=
# True)
# ax.add_artist(text)

for label in ax.get_xticklabels():
    label.set_fontproperties(fpetit)
for label in ax.get_yticklabels():
    label.set_fontproperties(fpetit)
for nom in llista:
    i = np.where(llista == nom)
    ax.text(
        lons[i] + 0.03,
        lats[i] + 0.03,
        nom,
        color='white',
        fontproperties=fpetit,
        transform=ccrs.Geodetic(),
        fontsize=9,
    )
plt.tight_layout()
plt.savefig('02_Figures/Mapa_boies.png', dpi=300,
           bbox_inches='tight')
plt.gcf().clear()
plt.cla()

```



```

plt.clf()
plt.close()

def prediccio_mapa(llista_fitxers, variable, data):
    '''
    ....Ploteja un mapa amb la prediccio de la variable desitjada
    per a l'instant concret.
    ....'''

    print '\nObtenint dades de la prediccio per al %s a les %s' \
          % (data.strftime('%Y-%m-%d'), data.strftime('%H:%M:%S'))
    f = prediccio_fitxer(llista_fitxers, data)
    with netc.Dataset(f) as pred:
        pred.set_auto_mask(False)
        idata_aprox = netc.date2index(data, pred.variables['time'],
                                     select='nearest')
        data_aprox = netc.num2date(pred.variables['time'][
            idata_aprox],
                                   pred.variables['time'].units)
        nom = data_aprox.strftime('%Y-%m-%d_%H:%M:%S')
        heatmap(pred.variables[variable][idata_aprox, :, :],
                (pred.variables['longitude'][:],
                 (pred.variables['latitude'][:], nom)

def heatmap(
    variable,
    longituds,
    latituds,
    titol,
):
    '''
    ....Ploteja un heatmap amb dades (lon, lat, valor).
    ....'''

    print '\nGenerant heatmap: "%s"' % titol
    fttitol = fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-Bold.
                                otf',

```

```

                                size=14)
fpetit = fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-
    Regular.otf'
                                , size=10)
fig = plt.subplots(figsize=(16, 8))
ax = plt.axes(projection=ccrs.Mercator())
ax.set_extent([-1, 7, 38.5, 44])
plt.contourf(longituds, latituds, variable, 60,
              transform=ccrs.PlateCarree())
plt.colorbar(orientation='vertical', format='%.2f_m')
europe_coastline = \
    ShapelyFeature(Reader('gis/Europe_coastline_4326.shp'
                          ).geometries(), ccrs.PlateCarree())
ax.add_feature(europe_coastline, facecolor='none', edgecolor
              = 'black'
              )
ax.add_wms(wms='http://ows.emodnet-bathymetry.eu/wms',
           layers=['emodnet:mean_atlas_land'])
gl = ax.gridlines(
    crs=ccrs.PlateCarree(),
    linewidth=0.7,
    color='black',
    alpha=0.4,
    linestyle='--',
    draw_labels=True,
)
gl.xlabels_top = gl.ylabels_right = None
gl.xformatter = LONGITUDE_FORMATTER
gl.yformatter = LATITUDE_FORMATTER
plt.title(titol, fontproperties=ftitol)
for label in ax.get_xticklabels():
    label.set_fontproperties(fpetit)
for label in ax.get_yticklabels():
    label.set_fontproperties(fpetit)
plt.tight_layout()
plt.show()

# plt.savefig('../figures/' + titol + '.png', dpi=300)

plt.gcf().clear()
plt.cla()

```

```

plt.clf()
plt.close()

def comparacio_mapa(fitxer_satelit, llista_pred):
    '''
    ....Ploteja un mapa amb la predicció, i per sobre el valor del
    satelit.
    ....'''

    print '\nPlotejant mapa comparatiu satelit-predicció...'
    sat_data = sat_lat = sat_lon = sat_val = []
    with netc.Dataset(fitxer_satelit) as sat:
        nom = getattr(sat, 'source')
        pos = np.column_stack((netc.num2date((sat.variables['
            time'
                                ])[:], sat.variables['time'].units
                                ),
                                (sat.variables['longitude'])[:],
                                (sat.variables['latitude'])[:],
                                (sat.variables['VAVH'])[:])))

        for (t, x, y, h) in pos:
            if h < 20:
                if x > 0.41 and x < 3.93:
                    if y > 40.35 and y < 42.68:
                        sat_data = np.append(sat_data, t)
                        sat_lon = np.append(sat_lon, x)
                        sat_lat = np.append(sat_lat, y)
                        sat_val = np.append(sat_val, h)

    if len(sat_data) > 0:
        data_ini = np.amin(sat_data[:])
        data_fi = np.amax(sat_data[:])
        fitxer_pred = prediccio_fitxer(llista_pred, data_ini)
        with netc.Dataset(fitxer_pred) as pred:
            pred.set_auto_mask(False)
            pred.set_auto_scale(True)
            idata_aprox = netc.date2index(data_fi, pred.
                variables['time'
                            ], select='nearest')
            data_aprox = netc.num2date(pred.variables['time'
                ][idata_aprox], pred.variables['time'].units

```

```

        )
        pred_lat = (pred.variables['latitude'])[:]
        pred_lon = (pred.variables['longitude'])[:]
        pred_val = pred.variables['VHM0'][idata_aprox, :, :]
ftitotl = fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-
        Bold.otf'
                                , size=14)

fpetit = \
        fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-
        Regular.otf',
                                size=10)

fig = plt.subplots(figsize=(16, 8))
ax = plt.axes(projection=ccrs.Mercator())
ax.set_extent([-1, 7, 38.5, 44], ccrs.PlateCarree())
plt.contourf(
        pred_lon,
        pred_lat,
        pred_val,
        100,
        cmap='jet',
        transform=ccrs.PlateCarree(),
        vmin=0.0,
        vmax=8.0,
        )
cax = ax.scatter(
        sat_lon,
        sat_lat,
        c=sat_val,
        cmap='jet',
        transform=ccrs.Geodetic(),
        vmin=0.0,
        vmax=8.0,
        )
plt.colorbar(cax, orientation='vertical', format='%.2f_m
        ',
                                extend='max')

# ax.add_wms(wms='http://ows.emodnet-bathymetry.eu/wms',
        layers=['emodnet:mean_atlas_land'])

ax.add_wms(wms='http://geoserveis.icgc.cat/icc_mapesbase

```

```

        /wms/service'
        , layers=['sat250m'])
europe_coastline = \
    ShapelyFeature(Reader('gis/Europe_coastline_4326.shp'
        ,
                        ).geometries(), ccrs.PlateCarree())
ax.add_feature(europe_coastline, facecolor='none',
               edgecolor='black')
gl = ax.gridlines(
    crs=ccrs.PlateCarree(),
    linewidth=0.7,
    color='black',
    alpha=0.4,
    linestyle='--',
    draw_labels=True,
)
gl.xlabels_top = gl.ylabels_right = None
gl.xformatter = LONGITUDE_FORMATTER
gl.yformatter = LATITUDE_FORMATTER
titol = nom + 'on' + data_aprox.strftime('%Y-%m-%d') +
    '(' \
    + data_ini.strftime('%H:%M') + 'h-' \
    + data_fi.strftime('%H:%M') + 'h)'
plt.title(titol, fontproperties=ftitol)
plt.savefig('C:/users/javi/desktop/a/' + nom + '_'
            + data_aprox.strftime('%Y-%m-%d') + '.png',
            dpi=300)
plt.gcf().clear()
plt.cla()
plt.clf()
plt.close()
else:
    print 'Aquest fitxer de satellit no passa a prop de la
        costa catalana.'

```

```

class Esri(GoogleTiles):

    def _image_url(self, tile):
        (x, y, z) = tile
        url = \

```

```

        'https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/
        services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x
        }.jpg'.format(z=z,
            y=y, x=x)
    return url

class TaylorDiagram(object):

    def __init__(
        self,
        refstd,
        fig=None,
        rect=111,
        label='_ ',
        srange=(0, 1.5),
        extend=False,
    ):
        from matplotlib.projections import PolarAxes
        import mpl_toolkits.axisartist.floating_axes as FA
        import mpl_toolkits.axisartist.grid_finder as GF

        self.refstd = refstd

        tr = PolarAxes.PolarTransform()

        rlocs = np.array([
            0,
            0.2,
            0.4,
            0.6,
            0.7,
            0.8,
            0.9,
            0.95,
            0.99,
            1,
        ])
        if extend:
            self.tmax = np.pi
            rlocs = np.concatenate((-rlocs[:0:-1], rlocs))

```

```

else:
    self.tmax = np.pi / 2
    tlocs = np.arccos(rlocs)
    gl1 = GF.FixedLocator(tlocs)
    tf1 = GF.DictFormatter(dict(zip(tlocs, map(str, rlocs))))
    )

self.smin = srangle[0] * self.refstd
self.smax = srangle[1] * self.refstd

ghelper = FA.GridHelperCurveLinear(tr, extremes=(0, self
    .tmax,
    self.smin, self.smax), grid_locator1=gl1,
    tick_formatter1=tf1)

if fig is None:
    fig = plt.figure()

ax = FA.FloatingSubplot(fig, rect, grid_helper=ghelper)
fig.add_subplot(ax)
ax.axis['top'].set_axis_direction('bottom')
ax.axis['top'].toggle(ticklabels=True, label=True)
ax.axis['top'].major_ticklabels.set_axis_direction('top'
    )
ax.axis['top'].label.set_axis_direction('top')
ax.axis['top'].label.set_text('Correlacion')

ax.axis['left'].set_axis_direction('bottom')
ax.axis['left'].label.set_text('Desviacion_estandar')

ax.axis['right'].set_axis_direction('top')
ax.axis['right'].toggle(ticklabels=True)
ax.axis['right'].major_ticklabels.set_axis_direction(('
    bottom'
    if extend else 'left'))
ax.axis['bottom'].set_visible(False)
self._ax = ax
self.ax = ax.get_aux_axes(tr)
(1, ) = self.ax.plot(
    [0],
    self.refstd,

```

```

        'r.',
        ls='',
        ms=20,
        label=label,
    )
    t = np.linspace(0, self.tmax)
    r = np.zeros_like(t) + self.refstd
    self.ax.plot(t, r, 'r-', label='_')
    self.samplePoints = [1]

def add_sample(
    self,
    stddev,
    corrcoef,
    *args,
    **kwargs
):
    (l, ) = self.ax.plot(np.arccos(corrcoef), stddev, *args,
                        **kwargs)
    self.samplePoints.append(l)
    return l

def add_grid(self, *args, **kwargs):
    self._ax.grid(*args, **kwargs)

def add_contours(self, levels=5, **kwargs):
    (rs, ts) = np.meshgrid(np.linspace(self.smin, self.smax)
                          ,
                          np.linspace(0, self.tmax))
    rms = np.sqrt(self.refstd ** 2 + rs ** 2 - 2 * self.
                  refstd * rs
                  * np.cos(ts))
    contours = self.ax.contour(ts, rs, rms, levels, **kwargs
    )
    return contours

```



## Script de ejemplo para la colocación de satélites

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-
from CMEMS import *

# Seleccio de dies

dia_i = dt.datetime(2017, 7, 1, 0, 0)
dia_f = dt.datetime(2017, 12, 31, 23, 0)

# Carpeta amb els fitxers de les boies i variable

fitxers_boia = fitxers_amb_variable('D:/Work/Boies/Banyuls', '
    VHMO')

cua = '_medwaves_swan'

# Carpeta amb els fitxers de prediccio i variable

fitxers_pred = \
    fitxers_amb_variable('D:/
        MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_006_017/',
        'VHMO')

# Itero per boies

for b in fitxers_boia:

    # Boia: posicio i nom

    posicio_boia = boia_posicio(b)
    nom_boia = boia_nom(b)
    nom_boia_curt = boia_nomcurt(b)

    print '\n□Boia:□%s' % nom_boia

    # Carpeta i colocacio de cadascun dels satellits

    f_s3a = \
```

```

fitxers_ncf('D:/
    SEALEVEL_GLO_WAV_L3_NRT_OBSERVATIONS_008_052/dataset-
    wav-alti-l3-rt-global-s3a'
    )
c_s3a = sat_colocacio_dates(posicio_boia, f_s3a, dia_i,
    dia_f)
p3a = len(c_s3a)

f_j3 = \
    fitxers_ncf('D:/
        SEALEVEL_GLO_WAV_L3_NRT_OBSERVATIONS_008_052/dataset-
        wav-alti-l3-rt-global-j3'
        )
c_j3 = sat_colocacio_dates(posicio_boia, f_j3, dia_i, dia_f)
pj3 = len(c_j3)

f_al = \
    fitxers_ncf('D:/
        SEALEVEL_GLO_WAV_L3_NRT_OBSERVATIONS_008_052/dataset-
        wav-alti-l3-rt-global-al'
        )
c_al = sat_colocacio_dates(posicio_boia, f_al, dia_i, dia_f)
pal = len(c_al)

# Estadistics

hm0_boia = hm0_pred = hm0_pred_s = hm0_boia_s3a =
    hm0_boia_j3 = \
        hm0_boia_al = hm0_s3a = hm0_j3 = hm0_al = []

# Llista de dates

dates_global = dates_s3a = dates_j3 = dates_al = []

if p3a > 0:
    dates_global = np.append(dates_global, c_s3a[:, 0])
    dates_s3a = np.append(dates_s3a, c_s3a[:, 0])
    dates_s3a.sort()
    boia_s3a = boia_variable_dates(b, 'VHM0', dates_s3a)
    hm0_boia_s3a = np.append(hm0_boia_s3a, boia_s3a[:, 1])
    hm0_s3a = np.append(hm0_s3a, c_s3a[:, 4])

```

```

desv_boia_s3a = statistics.stdev(hm0_boia_s3a)
desv_s3a = statistics.stdev(hm0_s3a) / desv_boia_s3a
rmse_s3a = RMSE_centrat(hm0_boia_s3a, hm0_s3a) /
    desv_boia_s3a
corr_s3a = Correlacio(hm0_boia_s3a, hm0_s3a)

if pj3 > 0:
    dates_global = np.append(dates_global, c_j3[:, 0])
    dates_j3 = np.append(dates_j3, c_j3[:, 0])
    dates_j3.sort()
    boia_j3 = boia_variable_dates(b, 'VHM0', dates_j3)
    hm0_boia_j3 = np.append(hm0_boia_j3, boia_j3[:, 1])
    hm0_j3 = np.append(hm0_j3, c_j3[:, 4])
    desv_boia_j3 = statistics.stdev(hm0_boia_j3)
    desv_j3 = statistics.stdev(hm0_j3) / desv_boia_j3
    rmse_j3 = RMSE_centrat(hm0_boia_j3, hm0_j3) /
        desv_boia_j3
    corr_j3 = Correlacio(hm0_boia_j3, hm0_j3)

if pal > 0:
    dates_global = np.append(dates_global, c_al[:, 0])
    dates_al = np.append(dates_al, c_al[:, 0])
    dates_al.sort()
    boia_al = boia_variable_dates(b, 'VHM0', dates_al)
    hm0_boia_al = np.append(hm0_boia_al, boia_al[:, 1])
    hm0_al = np.append(hm0_al, c_al[:, 4])
    desv_boia_al = statistics.stdev(hm0_boia_al)
    desv_al = statistics.stdev(hm0_al) / desv_boia_al
    rmse_al = RMSE_centrat(hm0_boia_al, hm0_al) /
        desv_boia_al
    corr_al = Correlacio(hm0_boia_al, hm0_al)

dates_global.sort()

# Boies (instants)

boia_global = boia_variable_dates(b, 'VHM0', dates_global)
hm0_boia = np.append(hm0_boia, boia_global[:, 1])
desv_boia = statistics.stdev(hm0_boia)
rmse_boia = RMSE_centrat(hm0_boia, hm0_boia)
corr_boia = Correlacio(hm0_boia, hm0_boia)

```

```

# Predicció. Comentar segons vulgui CMEMS/SWAN

pred_global = prediccio_variable_dates(fitxers_pred, 'VHM0',
                                       posicio_boia, dates_global)
hm0_pred = np.append(hm0_pred, pred_global[:, 1])
desv_pred = statistics.stdev(hm0_pred) / desv_boia
rmse_pred = RMSE_centrat(hm0_boia, hm0_pred) / desv_boia
corr_pred = Correlacio(hm0_boia, hm0_pred)

pred_global_s = boia_swan_dates('D:/SWAN/Boies/' +
                                nom_boia_curt
                                + '.dat', dates_global)
hm0_pred_s = np.append(hm0_pred_s, pred_global_s[:, 2])
desv_pred_s = statistics.stdev(hm0_pred_s) / desv_boia
rmse_pred_s = RMSE_centrat(hm0_boia, hm0_pred_s) / desv_boia
corr_pred_s = Correlacio(hm0_boia, hm0_pred_s)

with open('03_Estadistics/' + nom_boia_curt + '_sat' + cua +
         '.txt'
         , 'a') as text:
    text.write('%s_%.2f_%.2f_%.2f\n' % (nom_boia,
        desv_boia,
        rmse_boia, corr_boia))
    text.write('d_boia_=%.2f\n' % desv_boia)
    text.write('r_boia_=%.2f\n' % rmse_boia)
    text.write('c_boia_=%.2f\n' % corr_boia)
    text.write('%s_%.2f_%.2f_%.2f\n' % ('Med-Waves',
        desv_pred, rmse_pred, corr_pred))
    text.write('d_pred_=%.2f\n' % desv_pred)
    text.write('r_pred_=%.2f\n' % rmse_pred)
    text.write('c_pred_=%.2f\n' % corr_pred)
    text.write('%s_%.2f_%.2f_%.2f\n' % ('SWAN',
        desv_pred_s,
        rmse_pred_s, corr_pred_s))
    text.write('d_pred_s_=%.2f\n' % desv_pred_s)
    text.write('r_pred_s_=%.2f\n' % rmse_pred_s)
    text.write('c_pred_s_=%.2f\n' % corr_pred_s)

if p3a > 0:
    with open('03_Estadistics/' + nom_boia_curt + '_sat' +

```

```

cua
    + '.txt', 'a') as text:
    text.write('%s_&_%.2f_&_%.2f_&_%.2f\n' % ('Sentinel_
        3A',
            desv_s3a, rmse_s3a, corr_s3a))
    text.write('d_boia_s3a_=%s;\n' % desv_boia_s3a)
    text.write('d_s3a_=%s;\n' % desv_s3a)
    text.write('r_s3a_=%s;\n' % rmse_s3a)
    text.write('c_s3a_=%s;\n' % corr_s3a)

if pj3 > 0:
    with open('03_Estadistics/' + nom_boia_curt + '_sat' +
        cua
            + '.txt', 'a') as text:
            text.write('%s_&_%.2f_&_%.2f_&_%.2f\n' % ('Jason_3',
                desv_j3, rmse_j3, corr_j3))
            text.write('d_boia_j3_=%s;\n' % desv_boia_j3)
            text.write('d_j3_=%s;\n' % desv_j3)
            text.write('r_j3_=%s;\n' % rmse_j3)
            text.write('c_j3_=%s;\n' % corr_j3)

if pal > 0:
    with open('03_Estadistics/' + nom_boia_curt + '_sat' +
        cua
            + '.txt', 'a') as text:
            text.write('%s_&_%.2f_&_%.2f_&_%.2f\n' % ('SARAL/
                AltiKa',
                    desv_al, rmse_al, corr_al))
            text.write('d_boia_al_=%s;\n' % desv_boia_al)
            text.write('d_al_=%s;\n' % desv_al)
            text.write('r_al_=%s;\n' % rmse_al)
            text.write('c_al_=%s;\n' % corr_al)

# Boia

boiafull = boia_variable_interval(b, 'VHM0', dia_i, dia_f)

# Predicció. Comentar segons vulgui CMEMS/SWAN

predfull = prediccio_variable_interval(fitxers_pred, 'VHM0',
    posicio_boia, dia_i, dia_f)

```

```

swanfull = boia_swan('D:/SWAN/Boies/' + nom_boia_curt + '.
    dat',
                    dia_i, dia_f)

# Grafic

ftitol = fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-Bold.
    otf',
                            size=16)
feixos = fm.FontProperties(fname='fonts/SF-Pro-Display-
    Regular.otf'
                            , size=16)
(fig, ax) = plt.subplots(figsize=(16, 8))
plt.title(nom_boia, fontproperties=ftitol)
ax.plot_date(boiafull[:, 0], boiafull[:, 1], '-', lw=2,
             label=nom_boia)
ax.plot_date(predfull[:, 0], predfull[:, 1], '-', lw=2,
             label='Med-Waves')
ax.plot_date(swanfull[:, 0], swanfull[:, 2], '-', lw=2,
             label='SWAN'
             )
if p3a > 0:
    ax.scatter(c_s3a[:, 0], c_s3a[:, 4], label='Sentinel_3A'
              ,
              zorder=10)
if pj3 > 0:
    ax.scatter(c_j3[:, 0], c_j3[:, 4], label='Jason_3',
              zorder=10)
if pal > 0:
    ax.scatter(c_al[:, 0], c_al[:, 4], label='SARAL/AltiKa',
              zorder=10)
ax.legend(loc='upper_right', prop=feixos)
ax.set_ylabel('Wave_height(m)', fontproperties=feixos)
for label in ax.get_xticklabels():
    label.set_fontproperties(feixos)
for label in ax.get_yticklabels():
    label.set_fontproperties(feixos)
fig.autofmt_xdate()
plt.tight_layout()
plt.savefig('02_Figures/5_' + nom_boia_curt + '_sat' + cua +
            '.png'

```

```

        , dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.gcf().clear()
plt.cla()
plt.clf()
plt.close(fig)

# Diagrama de Taylor

dades = np.array([[desv_pred, corr_pred], [desv_sat,
    corr_sat]])
noms = ['CMEMS', 'SWAN', nom_sat]
fig = plt.figure(figsize=(16, 8))
dia = TaylorDiagram(desv_boia, fig=fig, label=nom_boia)
colors = plt.matplotlib.cm.jet(np.linspace(0, 1, len(dades))
    )
for (i, (desviacio_estandard, coef_correlacio)) in enumerate
    (dades):
    dia.add_sample(
        desviacio_estandard,
        coef_correlacio,
        marker='$%d$' % (i + 1),
        ms=12,
        ls='',
        mfc=colors[i],
        mec=colors[i],
        label='%s' % noms[i],
    )

# Afegeixo graella

dia.add_grid(linestyle=':')
dia._ax.axis[:].major_ticks.set_tick_out(True)

# Radis del RMSD

contours = dia.add_contours(colors='seagreen', linewidths
    =1.)
plt.clabel(contours, inline=1, fontsize=11, fmt='%.1f')

# Afegeixo la llegenda

```

```

fig.legend(dia.samplePoints, [p.get_label() for p in
    dia.samplePoints], numpoints=1, prop=dict(size='
        small'),
    loc='upper_right')
plt.savefig('02_Figures/' + nom_boia_curt + '_' + s + '.png'
    ,
        dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.gcf().clear()
plt.cla()
plt.clf()
plt.close(fig)

```